ATLAS

de lo

EXTRAORDINARIO

Vida y Evolución

VOLUMEN I



DEBATE

ediciones delPrado

ATLAS DE LO EXTRAORDINARIO

VIDA Y EVOLUCIÓN

Volumen I

ATLAS DE LO EXTRAORDINARIO

VIDA Y EVOLUCIÓN

Volumen I

DEBATE
ediciones delPrado

Dirección editorial de la serie:
Juan María Martínez
Ángel Lucía

Coordinación editorial de la serie:
Juan Ramón Azaola
Carlos Ponce

Dirección técnica de la serie:
Eduardo Peñalba

Coordinación técnica de la serie: Rolando Dias
Edición: Luis G. Martín, Íñigo Castro, Lourdes Lucía, Richard Rosenfeld, Edward Bunting, Tony Hall y Dan Millar
Fotografía y documentación gráfica: José María Sáenz Almeida, Marta Carranza, Juan García Costoso, Nano Cañas, Charlotte Deane y Anne Horton
Investigación: Arthur Butterfield e Ian Knight
Diseño: Ruty Stopnitzki Orbach
Producción: Hugh Allan
Texto: Michael Groushko
Suscripciones: Francisco Perales
Versión castellana: María Victoria y Flora Casas

Título original: *Lost Treasures of the World*

ISBN: 84-7444-291-5 Volumen II
Depósito legal: B-4.789-1993

Impreso y encuadernado en Edigraf, Barcelona

Foto de cubierta: Máscara funeraria de Tut Anj Amón.
Fotografía de Derek Berwin, The Image Bank.

Sumario

Volumen I

INTRODUCCIÓN

La adaptación es el aspecto más notable de la vida: todos los organismos parecen encontrarse perfectamente adaptados a las demandas de su existencia cotidiana, tanto en su anatomía como en su fisiología y comportamiento. Al parecer, la naturaleza ha dotado a cada organismo —sea grande o pequeño, corriente o raro— con el equipo necesario para alcanzar el éxito en la vida, o al menos para intentarlo con posibilidades. Este hecho se ha venido intentando explicar desde que los griegos empezaron a estudiar seriamente la naturaleza del mundo, hace más de dos milenios. Para los estudiosos anteriores a la teoría evolucionista de Darwin, la respuesta parecía obvia: la adaptación era una manifestación de la obra de Dios, el resultado de los designios divinos. El estudio de la obra de Dios en la naturaleza se denominaba Teología Natural. Para los biólogos modernos, la respuesta es igualmente obvia: es la selección natural la que adapta los organismos a su ambiente, por acumulación gradual de pequeños cambios, en respuesta a las condiciones dominantes del medio ambiente.

Esta sustitución de explicaciones —del designio divino a la selección natural— fue la segunda de las dos grandes y radicales revoluciones intelectuales de los últimos quinientos años. La primera, la revolución copernicana de mediados del siglo XVI, acabó con el concepto de la Tierra como centro del universo y objeto principal de la atención divina, reduciéndola a ser uno más de los planetas que giran alrededor del Sol. Tres siglos después, la revolución iniciada por Charles Darwin (1809-1882) dejó sentado que los organismos de la Tierra —incluidos los seres humanos— no eran creaciones inmutables de Dios, sino el producto de un proceso de reproducción con modificación, que se denominó evolución.

Ya antes de Darwin, los estudiosos habían advertido la existencia de similitudes entre especies, lo cual permitió al naturalista sueco Carlos Linneo (1707-1778) elaborar una detallada clasificación de las principales formas de vida. En sus aspectos fundamentales, la clasificación linneana sigue teniendo validez. Los científicos ordenaron las especies en una jerarquía, desde las formas «inferiores» a las «superiores», con el *Homo sapiens* ocupando la posición más alta, un poco por debajo de los ángeles. Esta Gran Cadena de la Existencia constituía una manifestación estática de la creatividad divina. Para los científicos posteriores a Darwin, las similitudes entre especies son una indicación de su parentesco evolutivo, ya que, en último término, todas las especies descienden de un antepasado común (o de unos pocos). Así pues, el concepto de descendencia con modificación transformó la Gran Cadena de la Existencia en un registro histórico del proceso dinámico de la evolución.

Cuando Darwin publicó *El origen de las especies* en noviembre de 1859 expresó del siguiente modo sus aspiraciones: «Tenía dos claros objetivos: en primer lugar, demostrar que las especies no se habían creado por separado; y en segundo, demostrar que el principal agente de cambio había sido la selección natural.» El primer objetivo se cumplió de inmediato; el segundo tardó algo más. La selección natural no llegó a ser aceptada como principal agente del cambio evolutivo hasta los años cuarenta del siglo XX, mucho después de la muerte de Darwin.

Darwin no fue, ni mucho menos, el primero en escribir acerca de la evolución, denominada en aquellos tiempos la transmutación de las especies. Su propio abuelo, Erasmus Darwin (1731-1802), había escrito numerosos ensayos sobre el parentesco de las especies y la herencia, especulando acerca de los mecanismos de la transmutación. Sus ideas estaban inspiradas en las del biólogo francés Jean-Baptiste de Lamarck (1744-1829), cuya teoría de la herencia de los caracteres adquiridos alcanzó gran popularidad e intrigó al joven Darwin. Durante la primera mitad del siglo XIX se escribieron en Europa y Estados Unidos muchos libros y artículos acerca de otros posibles mecanismos de transmutación, algunos de los cuales se acercaban mucho al concepto de la selección natural. Y Darwin estuvo a punto de que se le adelantasen, ya que en 1858 el naturalista británico Alfred Russel Wallace (1823-1913) había llegado también a la conclusión de que el agente de la transmutación era la selección natural.

Como se ve, la idea de la evolución llevaba bastante tiempo en el aire cuando se publicó *El origen de las especies,* y sus tesis encontraron buena acogida en la comunidad científica, aunque no en los círculos religiosos. El libro que Darwin describía como «una larga argumentación» era un detallado compendio de datos obtenidos de la observación de la naturaleza, la geología, la embriología, la paleontología y la cría y cultivo de animales y plantas domésticos. El peso de la evidencia era incontestable y la transmutación se aceptó como un hecho. Sin embargo, la selección natural, basada en la herencia de variaciones genéticas favorables, se miraba con más escepticismo; entre otras razones, porque en aquella época se sabía muy poco sobre los mecanismos de la herencia y el cambio genético.

Por otra parte, daba la impresión —acertada— de que la selección natural trazaba una ruta evolutiva sin propósito alguno, en la que los cambios biológicos seguían ciegamente a los cambios ambientales. Durante los últimos años del siglo XIX y los primeros del XX, la mayoría de los biólogos se inclinaba por el concepto de la evolución progresiva, que iba produciendo formas de vida cada vez más complejas y avanzadas. En este contexto intelectual, el azar ciego resultaba filosóficamente inaceptable como elemento clave de la maquinaria evolutiva.

En 1865, el fraile austriaco Gregor Mendel (1822-1884) estableció las bases de la genética moderna con sus experimentos de cultivo de guisantes. Sus trabajos demostraron que la herencia de caracteres como el color y la forma era atomística, es decir, determinada por entidades genéticas independientes. Sin embargo, las ideas de Mendel pasaron inadvertidas durante cuatro décadas y no se redescubrieron hasta el principio del siglo XX, siendo inmediatamente utilizadas para respaldar una teoría contraria a la de la selección natural: para los destacados genetistas Hugo de Vries (1848-1935) y William Bateson (1861-1926), la evolución procedía mediante macromutaciones, o grandes saltos, y no por cambios acumulativos, como sostenía la hipótesis de la selección natural.

Sin embargo, en los años treinta, el tratamiento matemático de la genética mendeliana, llevado a cabo por los británicos Ronald A. Fisher (1890-1962) y J. B. S. Haldane (1892-1964) y el norteamericano Sewell Wright (1889-1988), demostró que la herencia de unidades genéticas discretas, conocidas actualmente como genes, era compatible con la variación continua de caracteres observada en las poblaciones. La teoría de Darwin había adquirido por fin lo que le había faltado durante medio siglo: una base en que apoyarse, consistente en una teoría comprobada de la herencia. Estos trabajos matemáticos, combinados con los avances de la biología de poblaciones, rehabilitaron al agente fundamental de la evolución darwinista, y la selección natural se convirtió en la pieza clave de la teoría evolutiva moderna. La publicación en 1942 del libro de Julian Huxley (1887-1975) *Evolución: la síntesis moderna* señaló el comienzo de la hegemonía de la teoría moderna, conocida también como neodarwinismo.

El neodarwinismo adquirió tanta fuerza que se convirtió en el factor de unificación de toda la biología. Los cambios acumulativos que constituyen la materia prima de la selección natural llegaron a considerarse como la fuente de todo cambio evolutivo, desde las modificaciones más ligeras —como un simple cambio de color— hasta las grandes innovaciones, como la aparición del sistema reproductivo de los mamíferos a partir del de sus antepasados reptiles. Desde este punto de vista, los grandes cambios eran similares a los pequeños, sólo que extrapolados a mayor escala.

Era inevitable que un concepto tan ambicioso se pusiera en tela de juicio. En 1972, los paleontólogos norteamericanos Niles Eldredge y Stephen Jay Gould adujeron que la selección natural, tal como la presentaba el neodarwinismo, era incapaz de explicar las pautas evolutivas observadas en el registro fósil. Las especies no cambian de manera gradual y continua a lo largo de su existencia, sino que tienden a permanecer inalteradas después de haber evolucionado, y tras un largo período de equilibrio se extinguen o cambian rápidamente. Esta pauta de cambio, conocida como equilibrio puntuado, parecía indicar que, por importante que fuera la selección natural para el progreso evolutivo, sus efectos se encontraban sometidos a fuertes restricciones. Por ejemplo, las vías de desarrollo embrionario pueden ser limitadas, lo cual reduce la gama de formas corporales posibles. En consecuencia, cuando el cambio es posible, se produce con rapidez.

Esto provocó un intenso debate acerca de la realidad de las pautas descritas por Eldredge y Gould y los mecanismos subyacentes. El registro fósil es muy incompleto, argumentaban algunos, y a veces puede dar una falsa impresión de equilibrio puntuado. Durante la última década, esto se ha estudiado con detalle, comprobándose que los cambios evolutivos a veces son graduales y otras veces puntuados. Parte del debate se centra en si es más posible que surjan especies nuevas como resultado del cambio gradual o del puntuado, aspecto que aún no ha quedado resuelto.

Como consecuencia de este debate y de las investigaciones que impulsó, el neodarwinismo se ha ampliado y enriquecido. Su núcleo central continúa siendo la selección natural, pero se acepta que otros factores (entre ellos las limitaciones al desarrollo) pueden influir en los posibles resultados, tanto al nivel de individuos en el seno de una especie como al del éxito relativo de diferentes especies.

En tiempos de Darwin, las pruebas fósiles eran escasas y el registro estaba muy incompleto. Por diversas razones teóricas, Darwin eludió el tema de las ocasionales extinciones masivas, alegando que si el registro fósil fuera más completo se demostraría que eran falsas, meras ilusiones creadas por las lagunas del registro. Sin embargo, en los últimos años se ha demostrado que las extinciones masivas fueron reales y tuvieron importantes consecuencias en la historia de la vida.

El mecanismo de la selección natural implica que el éxito de una especie viene determinado por su grado de adaptación a las circunstancias predominantes, incluyendo su interacción con otras especies (la lucha por la existencia, según palabras de Darwin). La especie que no es capaz de competir se extingue. Sin embargo, cuando se producen extinciones masivas, estas reglas cambian. Sea cual sea su causa —un cambio en el clima global o el impacto de un meteorito—, las extinciones masivas eligen como víctimas a especies cuyas características no tienen nada que ver con el éxito o el fracaso en condiciones normales. Por ejemplo, las especies de gran tamaño son más vulnerables a la extinción masiva, lo mismo que las especies con distribución geográfica limitada.

Así pues, cuando se produce una extinción masiva, desaparecen muchas especies, independientemente de su grado de adaptación. El reloj evolutivo se pone a cero y surgen nuevas especies a partir de los afortunados supervivientes. Este concepto añade un nuevo elemento de azar a la historia general de la vida.

Darwin demostró un considerable acierto al elegir argumentos para demostrar el hecho de la evolución y el principal mecanismo por el que se produce, y sus ideas continúan siendo el tema unificador de toda la biología moderna, desde la biología molecular y la genética hasta los ecosistemas más complejos. Este libro pretende captar la fuerza de dicho tema unificador, y se inspira en el párrafo final del *Origen:*

> *«Existe grandeza en esta idea de que la vida, con sus diversos potenciales, fue infundida por el Creador en unas pocas formas o en una sola; y en la idea de que mientras este planeta giraba siguiendo las leyes inmutables de la gravedad, de unos comienzos tan simples han evolucionado y siguen evolucionando infinitas formas, a cuál más bella y maravillosa.»*

Como Darwin, contemplamos asombrados la maravillosa creatividad de la naturaleza y consideramos que el conocimiento de sus leyes, lejos de disminuir su belleza, la aumenta.

Roger Lewin
Washington, D. C.



VIDA Y CAMBIO



La evolución es un fenómeno característico de los seres vivos. Consiste en la alteración de las formas de vida a lo largo del tiempo. Una de las formas que adopta el cambio evolutivo es la adaptación: la alteración lenta, generación tras generación, de la combinación de características que tipifican a una especie. Por ejemplo, los miembros de una especie de caracoles pueden tener más franjas en sus conchas que sus antecesores de varias generaciones atrás; o los miembros de una especie de ratón pueden tener el pelo más largo que sus antepasados inmediatos.

Estos cambios lentos y hereditarios pueden resultar útiles. Un mayor número de franjas en la concha puede mejorar el camuflaje del caracol, reduciendo el número de individuos devorados por los zorzales. Si el clima en el que viven los ratones se va haciendo más frío, un pelaje más largo reducirá la pérdida de calor y aumentará las probabilidades de supervivencia.



Estas alteraciones se denominan adaptaciones porque los organismos afectados quedan mejor adaptados a las condiciones concretas en las que viven. Los cambios adaptativos tienen lugar en diferentes poblaciones de una misma especie. En principio, todos los miembros de dicha especie podrían cruzarse entre sí, a pesar de las diferencias existentes entre los individuos.

El registro fósil nos proporciona una historia de la vida en el pasado, en la que vemos aparecer nuevas formas de animales y plantas, que prosperan durante cierto tiempo y acaban por extinguirse. Esto es consecuencia de cambios evolutivos más radicales, que conducen a la creación de nuevas especies, un proceso conocido como especiación. Si las adaptaciones heredadas en una población llegan a ser tan extremas que impiden el cruzamiento con miembros de otras poblaciones de la misma especie, se considera que la población alterada se ha transformado en una especie nueva, un nuevo tipo de organismo.

La especiación y la adaptación son realidades de la vida, y el estudio de la evolución trata de explicar por qué se producen de la manera en que se producen. A finales del siglo XVIII y principios del XIX se fue extendiendo la convicción de que los seres vivos cambian. Las ideas acerca de las causas de dichos cambios acabaron por cristalizar en una teoría científica, fruto de los esfuerzos de Charles Darwin y Alfred Russel Wallace, que a mediados del siglo XIX afirmaron que la dinámica de la vida y sus cambios evolutivos es el resultado de la selección natural.

La teoría de la selección natural se explica con facilidad en varias partes: en primer lugar, cada generación de una especie engendra más descendientes que los que finalmente sobrevivirán y lograrán reproducirse. En segundo lugar, todos los individuos de una generación de la especie podrían cruzarse, pero no todos son idénticos. En tercer lugar, algunas características variables pueden conferir a los individuos que las poseen una ventaja competitiva en la lucha por la supervivencia y la oportunidad de reproducirse, con lo cual estos individuos tendrían más posibilidades de engendrar la siguiente generación.

Suponiendo que estas características ventajosas sean hereditarias, se transmitirán a la siguiente generación con más frecuencia que las características desventajosas. Dicho de otro modo: son seleccionadas. Como consecuencia, la especie irá cambiando con el tiempo, y sus miembros estarán cada vez más adaptados al ambiente en el que procuran sobrevivir.

Esta secuencia de causas y efectos da lugar a una pauta de cambios que se conocen como adaptación. Se suele resumir en máximas del tipo «la supervivencia del mejor adaptado», pero estas simplificaciones pasan por alto aspectos muy importantes, como el carácter intrínseco e inevitable de la variación, quitando importancia al hecho de que la combinación de variaciones en una generación de plantas o animales debe ponerse a prueba bajo las condiciones en las que viven los organismos. Las generalizaciones tampoco explican un detalle fundamental: que las características ventajosas tienen que ser hereditarias para que actúe sobre ellas la selección natural.

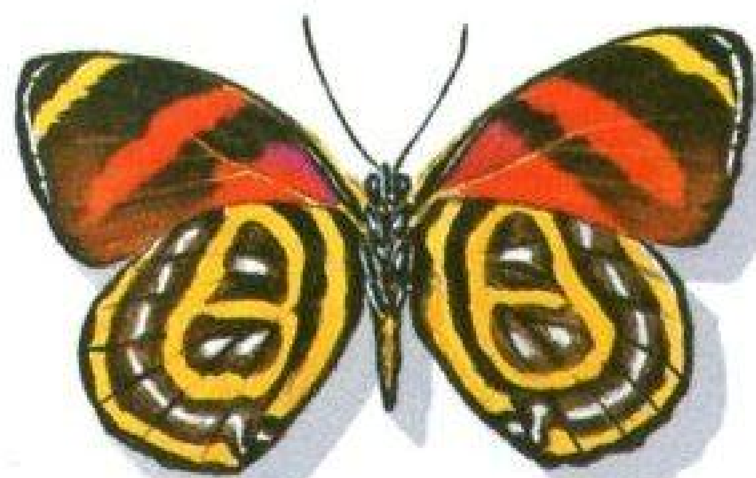


Aunque tiene ya 150 años, la teoría darwiniana sigue siendo la explicación más profunda que existe de la historia de la vida, e impregna toda las ciencias modernas de la vida. Los nuevos conocimientos acerca de la base molecular de la genética y los procesos vitales nos permiten simplemente redefinir las ideas de Darwin en un lenguaje más preciso.





LA EVOLUCIÓN DE LA EVOLUCIÓN



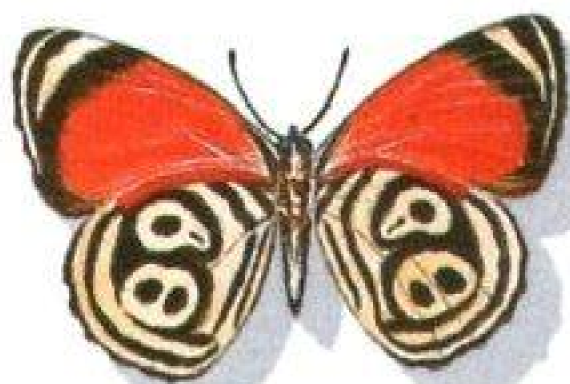
Callicore astarte



Callicore sorona

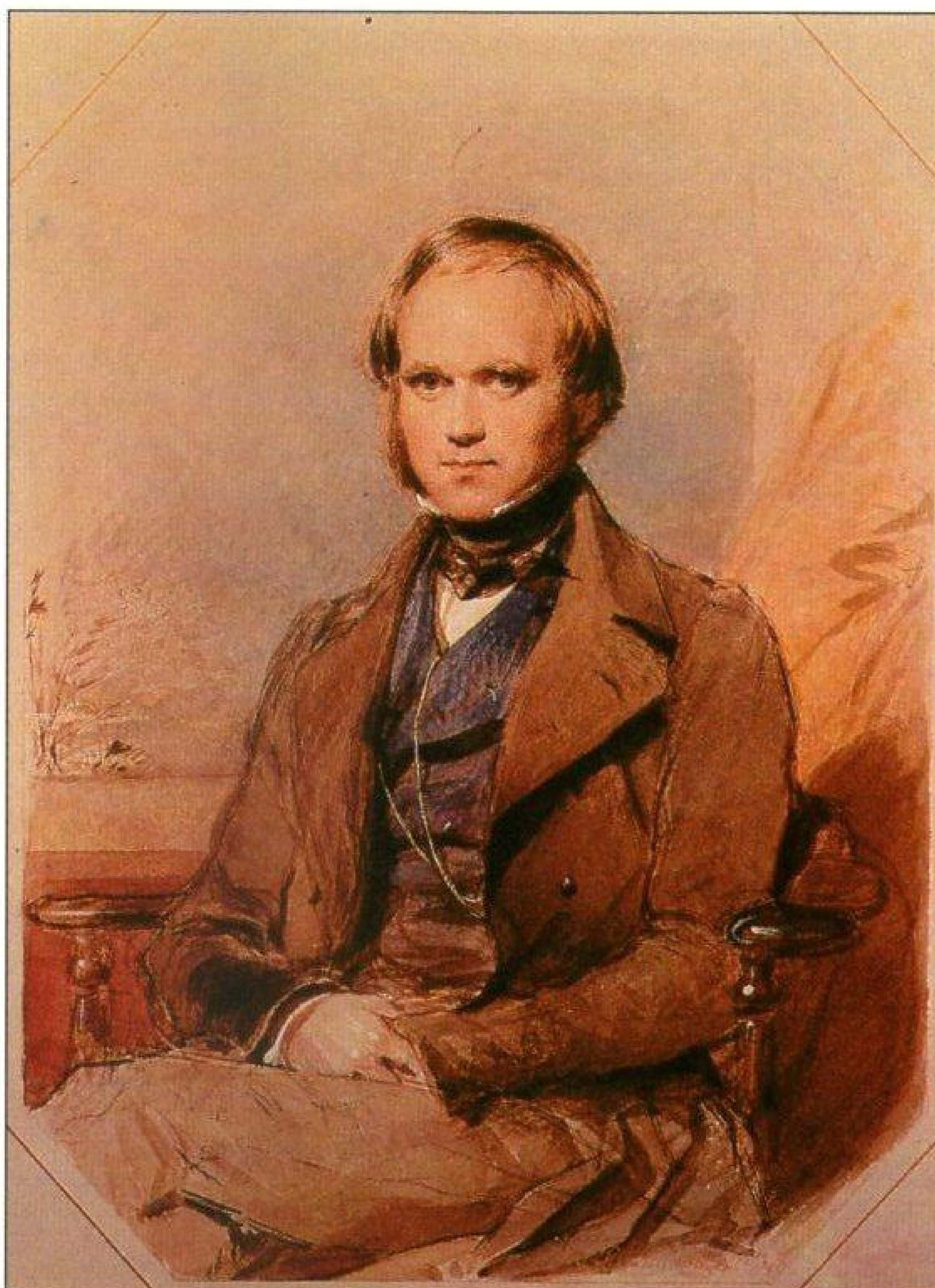


Callicore cynosura



Diaethria aurelia

Las teorías evolucionistas del siglo XIX se vieron reforzadas por la abundancia de nuevos conocimientos biológicos. Se pusieron de moda las colecciones de mariposas, escarabajos y otros animales, y se describió un enorme número de nuevas especies.



El libro de Charles Darwin sobre la evolución, *El origen de las especies por selección natural, o la preservación de las razas mejor adaptadas en la lucha por la vida,* obtuvo un éxito fulminante. La primera edición, de 1.250 ejemplares, se vendió entera el primer día de su publicación, en 1859.
Se puede decir que aquel año comenzó la era moderna de las ciencias de la vida. Los estudios de Darwin combinaban conocimientos de una docena de campos, y proporcionaron una base estructural única para la comprensión de la biología. A partir de 1859, todas las especulaciones serias acerca de la vida en la Tierra se encuadraron en el contexto de las teorías de Darwin acerca de la evolución y la selección natural. Este retrato de Darwin lo pintó George Richmond en 1840, cuatro años después del regreso del *Beagle.*

Considerando el prestigio e influencia que tiene hoy día la teoría de la evolución, resulta difícil imaginar su traumático nacimiento en la Inglaterra victoriana de hace 150 años. La evolución de la teoría de la evolución es una historia que combina grandes descubrimientos científicos, personalidades fascinantes y las presiones ejercidas sobre la ciencia por la sociedad y la religión.

En tiempos de Charles Darwin, la doctrina cristiana oficial afirmaba que la historia de la Tierra sólo abarcaba unos pocos miles de años, y exigía la aceptación literal del texto bíblico del Génesis como explicación del origen de todos los seres vivos, que serían productos especiales y únicos de un acto creador; los seres humanos constituirían el apogeo del proceso creador divino.

La mera insinuación de que los seres vivos cambiaban a lo largo del tiempo resultaba inaceptable. Se consideraba una blasfemia, ya que implicaba que las formas de vida creadas por Dios eran, de algún modo, imperfectas. La negación del cambio implicaba, a su vez, que todas las formas de vida creadas en un principio seguían existiendo; ¿por qué iba Dios a crear un animal o una planta, para luego dejar que se extinguiera?

Estos conceptos ortodoxos ya se ponían en tela de juicio mucho antes de que Darwin se embarcara en el viaje explorador del *Beagle* en 1831. Librepensadores de distintas tendencias disentían de la postura tradicional. Algunos tenían dudas filosóficas, pero otros se basaban en nuevas evidencias que se habían ido acumulando durante los siglos XVIII y XIX, relacionadas con la naturaleza y significado de los fósiles.

En muchas partes del mundo, los fósiles eran tan abundantes que resultaba imposible que pasaran inadvertidos, incluso para los profanos: abarrotaban las paredes de los acantilados, las laderas de las montañas y las playas. Constantemente se encontraban conchas, dientes, caparazones y huesos, todos transformados en piedra. Las hipóte-

sis acerca de su origen eran variadas y confusas: ¿Se trataba de los restos de organismos vivos o de algo muy diferente? Algunos creían que aquellas piedras de formas curiosas eran el producto de una fuerza vital de la Tierra, que se esforzaba por crear imágenes de los productos de la creación divina. Otros afirmaban que algunos huevos de animales habían quedado sepultados en las rocas y se habían desarrollado, formando tumores rocosos.

Pero las conexiones entre los fósiles y los animales existentes se iban haciendo cada vez más evidentes. Llegó un momento en el que ya no cabía duda de que los fósiles eran restos petrificados de seres que vivieron en otras épocas. Para explicar esto en términos aceptables por la religión, se recurrió al Diluvio narrado en la Biblia. Los fósiles serían los restos de los animales que se ahogaron en el diluvio, que quedaron enterrados para siempre en los sedimentos formados por la inundación. Esta teoría explicaba también por qué se encontraban restos de animales marinos en las rocas de las montañas: el diluvio provocó tremendos oleajes, que arrastraron conchas y otros restos marinos hasta lo alto de las montañas.

Sin embargo, continuaban surgiendo datos nuevos y problemáticos. Los estudios geológicos revelaron que las diferentes capas de roca sedimentaria no se podían haber formado al mismo tiempo, y el tiempo necesario para su formación parecía ser mucho mayor que unos pocos miles de años. Si los sedimentos y los fósiles no procedían todos de un mismo diluvio bíblico, tendrían que ser consecuencia de una serie de diluvios, el último de los cuales habría sido el de Noé. Las catástrofes anteriores no habían quedado recogidas en el Antiguo Testamento. Aún más preocupante para los tradicionalistas era la evidencia de que algunos fósiles correspondían a animales que ya no existían en la Tierra. Todo parecía indicar que se trataba de formas de vida extinguidas.

Durante algún tiempo, se intentó superar esta dificultad asegurando que aquellos animales aún debían existir en las regiones inexploradas del planeta. Sin embargo, esta postura defensiva resultó insostenible cuando se multiplicaron los hallazgos de fósiles y se aceleró el ritmo de las exploraciones. Si Dios había creado todos aquellos organismos en un acto único, era evidente que había permitido que algunos de ellos se extinguieran.

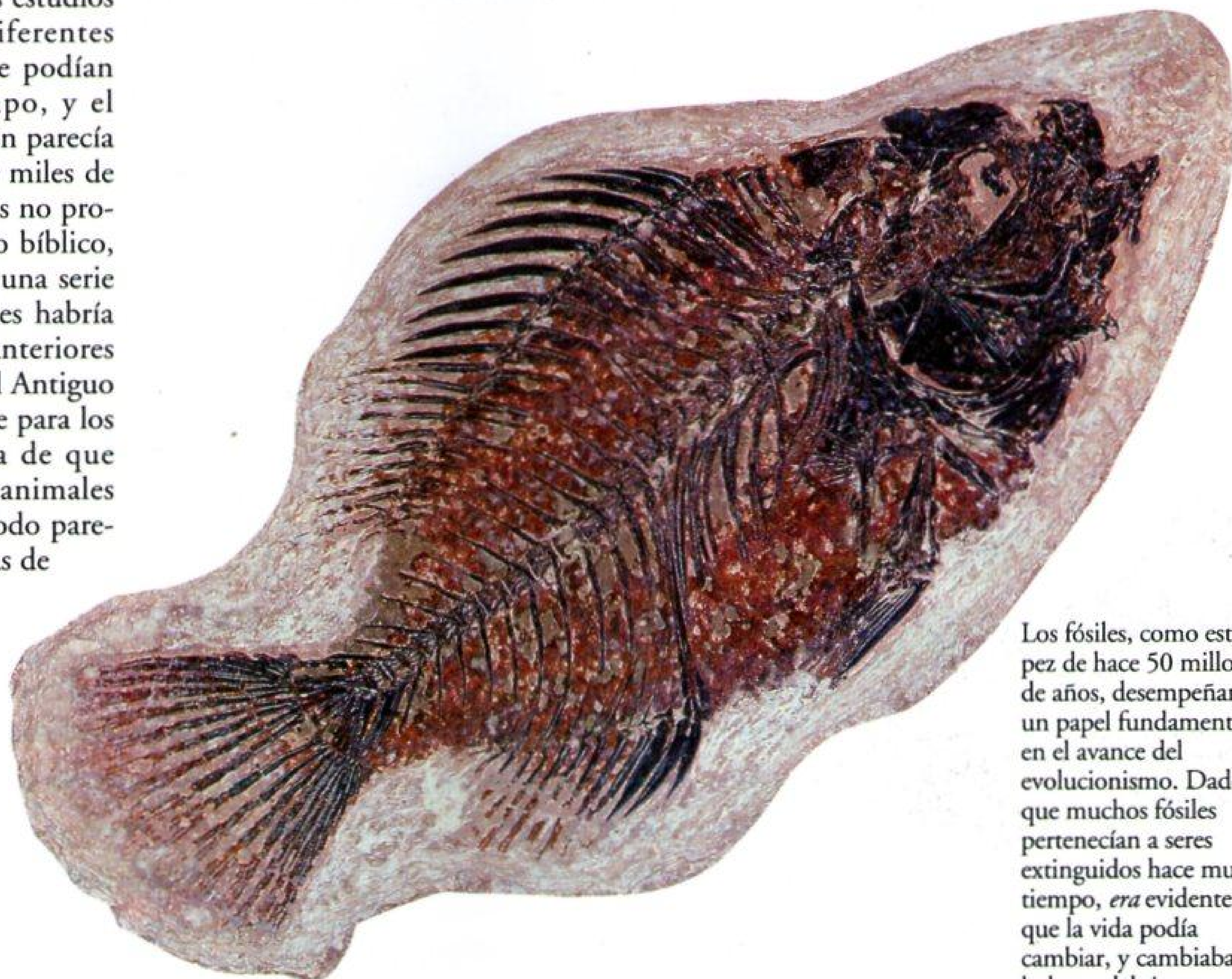
Así pues, los cambios experimentados por los seres vivos eran objeto de airados debates y controversias a finales del siglo XVIII y principios del XIX. Uno de los protagonistas de esta polémica fue un miembro de la baja nobleza francesa, Jean-Baptiste Antoine de Monet (1744-1829), que se autonombró Caballero de Lamarck y es conocido desde entonces simplemente como Lamarck. En la actualidad, sus ideas acerca de la organización de los seres vivos y su capacidad de cambio están desechadas, pero sería injusto olvidar a su autor. Enfrentándose a las convenciones religiosas de su época, Lamarck elaboró en 1809 la que se considera como la primera teoría explícita de la evolución.

Lamarck era un naturalista de campo competente y un experto botánico. Inventó el sistema de claves dicótomas para identificar especies desconocidas de animales y plantas por medio de sus características visibles. El sistema consta de una serie de preguntas, cada una con dos o más respuestas posibles, que remiten a nuevas preguntas similares. Al final de la secuencia se llega a la identificación de la especie.

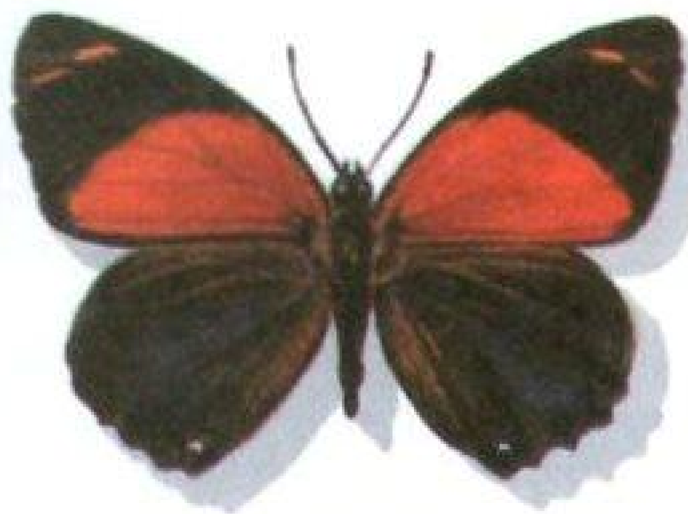
Veamos, por ejemplo, cómo el sistema de Lamarck permite identificar un kiwi respondiendo tan sólo a dos preguntas. Primera: ¿Se trata de un ave voladora o no voladora? Si no es voladora, ¿tiene el pico más del doble de largo que el resto de la cabeza? La única ave no voladora con el pico tan largo es el kiwi. El sencillo sistema de Lamarck ha resistido el paso del tiempo y continúa siendo el método habitual para codificar identificaciones.

Lamarck llegó a ocupar el cargo de Botánico Real en el Jardin du Roi de París, pero continuó enfrentándose a las posturas ortodoxas en sus análisis de los seres vivos. Sus estudios taxonómicos le convencieron de que los grupos de especies estaban emparentados unos con otros de maneras significativas, y de que las especies cambian con el tiempo. Expuso sus ideas sobre estos y otros temas en su libro *Philosophie zoologique*, publicado en 1809.

Lamarck creía que los diferentes tipos de animales, con sus distintos niveles de complejidad, formaban parte de un sistema de transformaciones a largo plazo. Los organismos más sencillos surgirían por «genera-



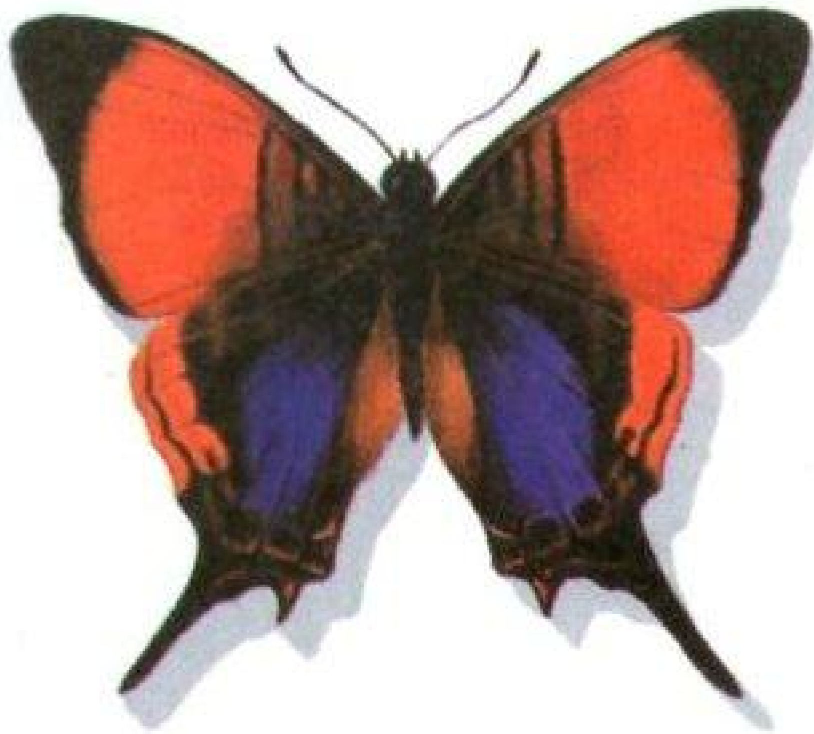
Los fósiles, como este pez de hace 50 millones de años, desempeñaron un papel fundamental en el avance del evolucionismo. Dado que muchos fósiles pertenecían a seres extinguidos hace mucho tiempo, *era* evidente que la vida podía cambiar, y cambiaba, a lo largo del tiempo.



Callicore maimuna



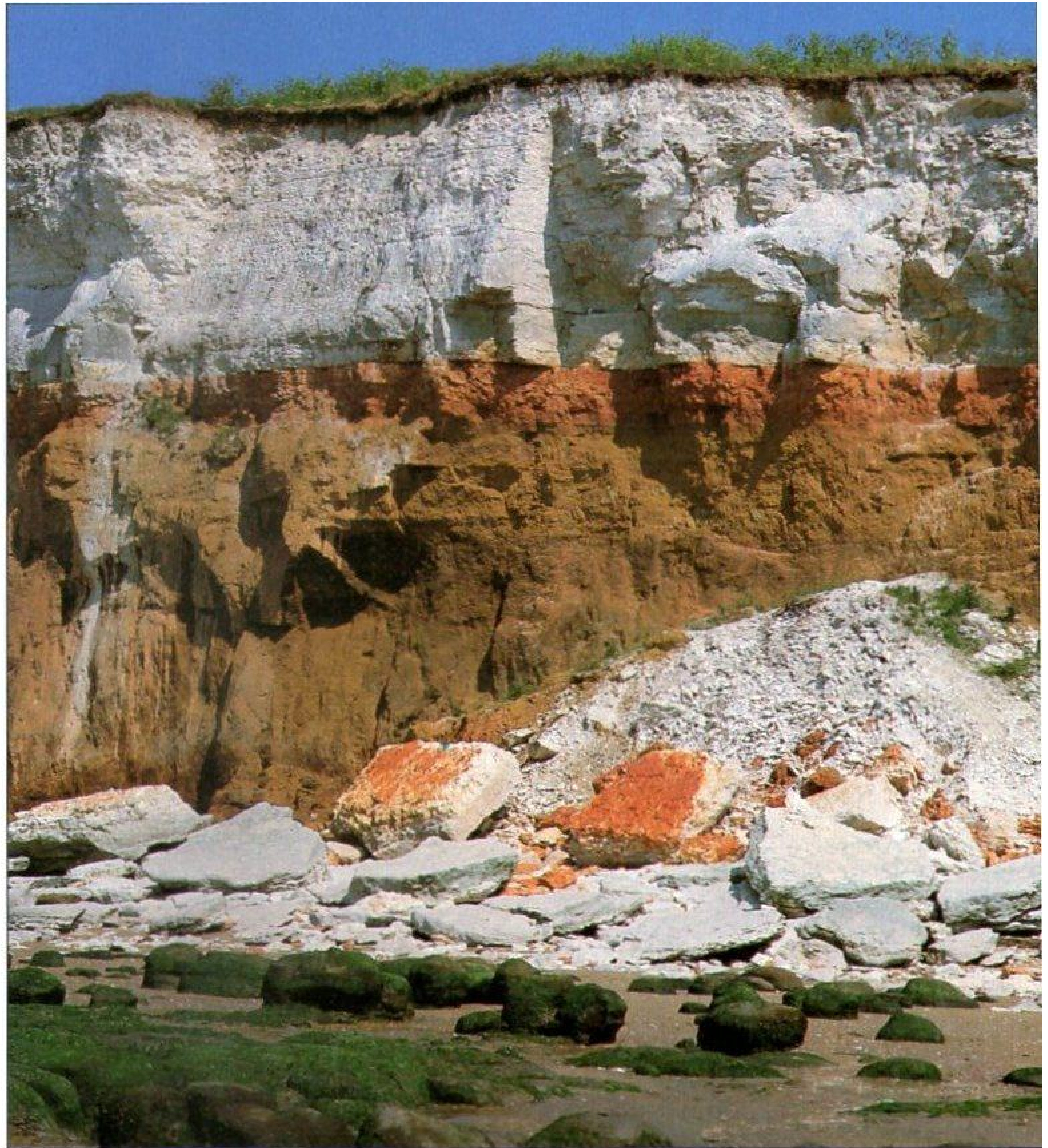
Callisthenia markii



Marpesia marcella



Catonephele numilea (macho)



ción espontánea» (un concepto que en aquel tiempo se aceptaba sin controversias), y desde allí iban ascendiendo, pasando por sucesivos niveles de complejidad, hasta llegar a la perfección de los seres humanos. Hace casi 200 años, en un ambiente de certidumbres religiosas, esta idea resultaba verdaderamente revolucionaria.

Por lo demás, gran parte de la «filosofía zoológica» de Lamarck quedaba desvirtuada por la falta de pruebas referentes a los mecanismos de las transformaciones. Lamarck opinaba que los animales ascendían en la escala evolutiva porque tenían voluntad de mejorar; este deseo de perfección sería el motor de los cambios. Por ejemplo, los antepasados de las jirafas habrían tenido el cuello corto, pero a fuerza de estirarlo para alcanzar las hojas más altas y jugosas, su cuello se habría alargado. Según Lamarck, los descendientes nacieron con cuellos más largos a consecuencia del deseo de los padres.

Esta identificación de la voluntad de cambio con el cambio mismo fue objeto de numerosas burlas, y el nombre de Lamarck ha quedado desprestigiado desde entonces. El simple sentido común demuestra que los cambios adquiridos durante la vida del individuo no se transmiten a sus descendientes. Los judíos llevan miles de años circuncidando a sus hijos, a pesar de lo cual siguen naciendo con prepucio.

A pesar de sus fallos, la teoría de Lamarck acerca de las jirafas reconocía varios hechos importantes, entre ellos que los antepasados de las jirafas tenían el cuello corto y que éste se había ido alargando. Dios quedaba eliminado como creador de todas las formas de vida en un momento único, y se demostraba que los animales no sólo han cambiado a lo largo del tiempo, sino que, además, estos cambios les han permitido adaptarse mejor a su medio ambiente. Lamarck reconoció acertadamente estos procesos, pero fracasó al intentar explicar sus mecanismos.

Esta explicación iba a correr a cargo de dos personajes fundamentales, de reputaciones muy desiguales. El nombre de Charles Darwin ha quedado irrevocablemente ligado al concepto de evolución, mientras que a Alfred Russel Wallace se le tiende a considerar como una figura



Los estratos de roca sedimentaria sin deformar, como estos acantilados de Norfolk, Inglaterra, correspondientes al Cretácico, permiten a los paleontólogos desentrañar el pasado. En general, los estratos inferiores son los más antiguos, y en cada estrato se encuentran fósiles del mismo período.

Lamarck, polémico naturalista del siglo XIX, creía que el cuello de la jirafa es tan largo a consecuencia de estirarlo hacia las ramas altas durante generaciones. Pero el ocapi, pariente cercano de la jirafa, lo estira del mismo modo y aun así su cuello sigue siendo tan corto como el de los antepasados fósiles de la jirafa. Esto demuestra que la evolución no se basa en simples pautas de uso o desuso.

secundaria. Pero lo cierto es que los dos llegaron, de manera independiente, a la misma explicación de los mecanismos del proceso evolutivo: la teoría de la selección natural.

Charles Darwin nació el 12 de febrero de 1809, y era hijo de un prestigioso médico. Su abuelo, Erasmus Darwin, también médico, había sido simpatizante de Lamarck, y escribió un largo poema titulado *Zoonomia*, que contenía esbozos de ideas evolucionistas. Charles se crió en el seno de la clase acomodada británica, y en 1839 se casó con su prima hermana, perteneciente a la familia Wedgwood, uno de los nombres más importantes de la industria británica.

En principio, Charles estaba destinado a seguir la carrera eclesiástica, y estudió en las Universidades de Edimburgo y Cambridge. Pero desde muy joven mostró una gran afición por la naturaleza, y le fascinaban de manera especial los escarabajos. Esta inclinación a coleccionar e identificar seres vivos le impulsó a tomar la decisión crucial que no sólo cambió su vida, sino también el curso de la ciencia.

Dicha decisión convirtió a una persona aparentemente normal en un científico extraordinario, posiblemente el que más ha hecho cambiar nuestra idea del mundo y de nosotros mismos.

A pesar de las fuertes presiones familiares para que continuara esforzándose para llegar a ser párroco rural, Darwin accedió a acompañar a James Fitzroy, capitán del bergantín HMS *Beagle*, en un viaje de exploración por todo el mundo que duraría cinco años. Su introductor fue uno de sus profesores de Cambridge, el botánico J. S. Henslow, que le explicó que el capitán Fitzroy andaba buscando un naturalista que además resultara un compañero de viaje agradable. Darwin procedía del sector social adecuado y era un ávido coleccionista.

El *Beagle* zarpó de Inglaterra en 1831, dos días después de Navidad. Recorrió las costas oriental y occidental de América del Sur y exploró las Galápagos y otras islas del Pacífico, regresando en 1836. Los descubrimientos y experiencias de este viaje —el único



Catonephele acontius (macho)



Catonephele acontius (hembra)



Myscelia cyaniris



Myscelia orsis

importante que Darwin realizó en su vida— ejercieron un profundo impacto en sus ideas, convenciéndole de que los seres vivos estaban relacionados entre sí porque poseían antepasados comunes, más o menos lejanos.

En los diarios y cuadernos de notas del viaje, y en los estudios realizados después del viaje, Darwin fue captando cada vez con mayor claridad que los caracteres comunes de especies similares eran consecuencia de un origen común, y no de un «plan divino» del Creador. Por ejemplo, la estructura esquelética de las extremidades de casi todos los mamíferos —dos huesos largos, otro hueso largo y una mano o pie de cinco dedos— le pareció una prueba de que todos los mamíferos descendían de un único antepasado que poseía dichas características.

Los fósiles de perezoso gigante que Darwin encontró en América del Sur le convencieron de la realidad de las extinciones, ya que sus únicos parientes vivos eran especies mucho más pequeñas. Observó que algunos animales poseían órganos «vestigiales» que al parecer carecían de función, y dedujo que la cola de múltiples vértebras de las aves, cuya función de inserción de las plumas podría haberse cumplido con una única vértebra, sólo podía explicarse suponiendo que las aves descendían de reptiles que poseían colas largas con muchas vértebras. ¿Por qué iba un creador a poner tantos huesos en la cola de un ave cuando podía haberle bastado con uno? Más adelante, en las islas Galápagos, Darwin descubrió muchas especies diferentes de pinzones que parecían emparentadas y llegó a la conclusión de que todas ellas descendían de una especie ancestral única, que había colonizado las islas procedente del continente suramericano, situado mucho más al este.

Durante la travesía, Darwin hizo embarcar cientos de ejemplares, que más tarde fueron analizados por él mismo y otros naturalistas. Acabó por convencerse de que los cambios evolutivos son un hecho en todos los seres vivos, una convicción que desbordaba las restricciones religiosas de un hombre que parecía destinado a párroco rural. Darwin se había convertido en un racionalista biológico.

Se dedicó entonces a investigar el mecanismo de los cambios que sufren las especies, y encontró inspiración en las teorías demográficas del reverendo Thomas Malthus (1736-1834). En su *Ensayo sobre el principio de población*, Malthus había argumentado que, dado que las poblaciones humanas crecen más deprisa que las reservas de provisiones, el resultado inevitable es el hambre y la competencia por los alimentos, que constituyen una fuerza reguladora que controla el crecimiento de las poblaciones.

En su autobiografía, Darwin declaraba «En octubre de 1838... leí por casualidad el



El brillante naturalista Alfred Russel Wallace (1823-1913) se ganaba la vida viajando por todo el mundo en busca de aves y mariposas para museos y colecciones privadas. Poco a poco se fue interesando en la evolución y, tras largos viajes por la Amazonia y Malasia, escribió un ensayo sobre *La ley que regula la aparición de nuevas especies.* Wallace sabía que aún no había dado con la clave del misterio de la evolución. Pero tres años después, mientras trabajaba en el Sureste Asiático, tuvo una inspiración. La lectura del ensayo de Malthus sobre la población le hizo pensar en la selección natural como motor de la evolución, sin saber que, al otro lado del mundo, Charles Darwin había llegado de manera independiente a las mismas conclusiones.

ensayo de Malthus sobre la población». Fue una casualidad que tuvo profundas consecuencias. Darwin tomó de Malthus el germen de una idea y elaboró con ella una teoría general sobre la dinámica de la vida.

En su forma más sencilla, dicha teoría afirma lo siguiente: cuando los miembros de una especie se reproducen, aumenta el número de individuos y tiene lugar una inevitable competencia por los alimentos y otros recursos. No todos los individuos están igual de bien dotados para esta competición, ya que siempre existe variedad dentro de la especie. Los individuos mejor adaptados para obtener recursos en un ambiente determinado tienden a sobrevivir y logran reproducirse, a costa de los peor adaptados.

Si las características ventajosas de los supervivientes se transmiten a su descendencia, la especie irá cambiando poco a



N ATTACKED BY DYAKS.

THE

MALAY ARCHIPELAGO:

THE LAND OF THE

ORANG-UTAN, AND THE BIRD OF PARADISE.

A NARRATIVE OF TRAVEL,

WITH STUDIES OF MAN AND NATURE.

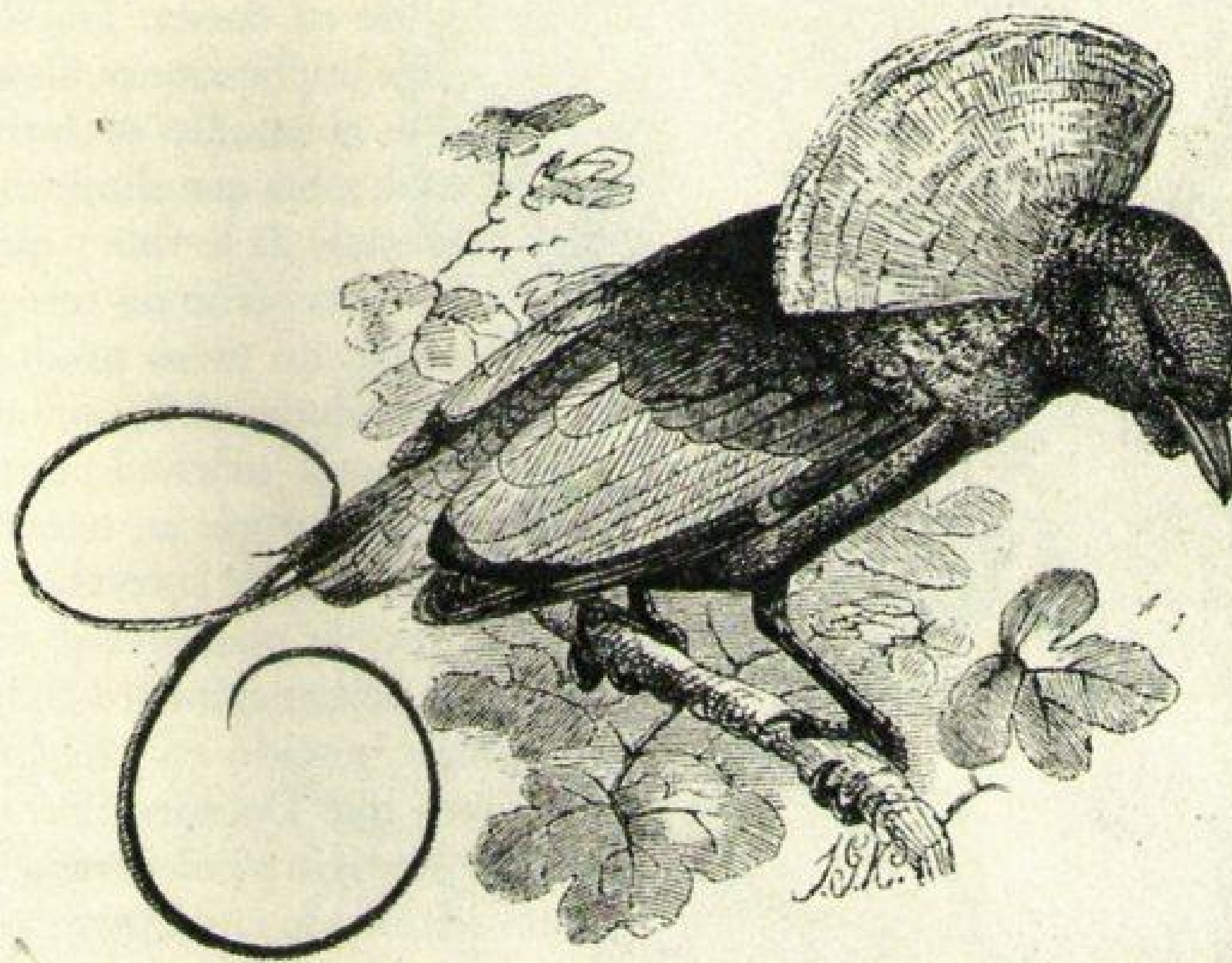
BY

ALFRED RUSSEL WALLACE,

AUTHOR OF

"TRAVELS ON THE AMAZON AND RIO NEGRO," "PALM TREES OF THE AMAZON," ETC.

IN TWO VOLS.—VOL. I.



London:

MACMILLAN AND CO.

1869.

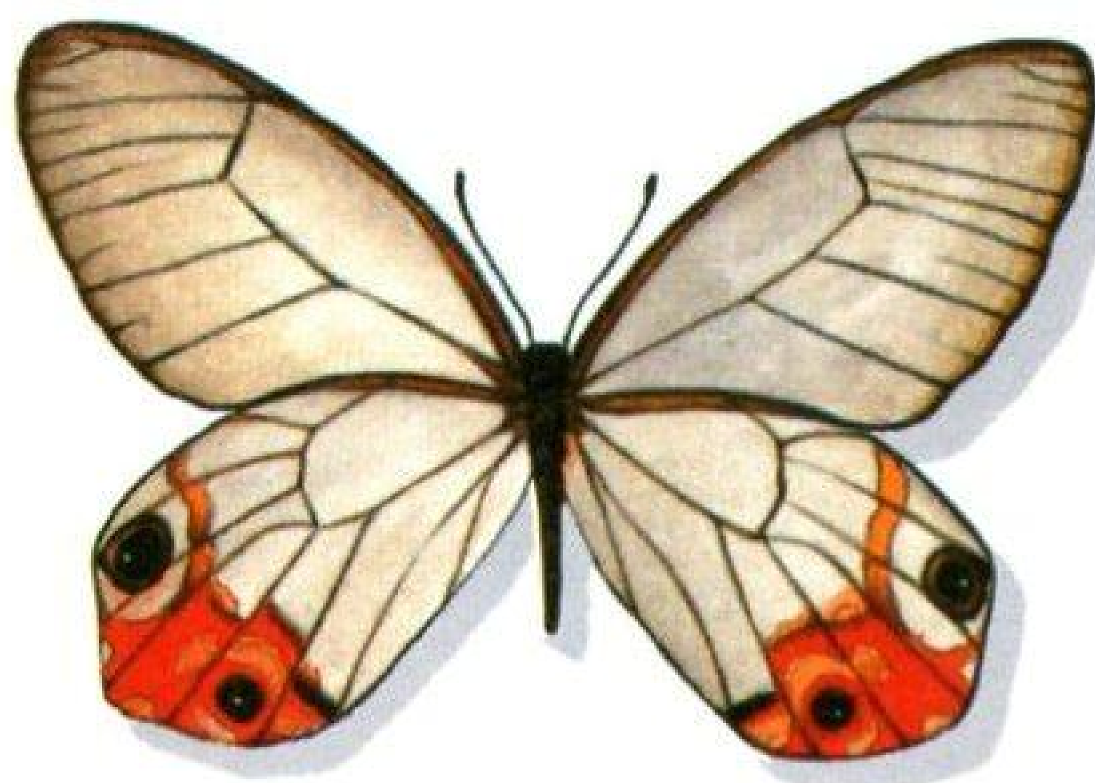
[*The Right of Translation and Reproduction is reserved.*]



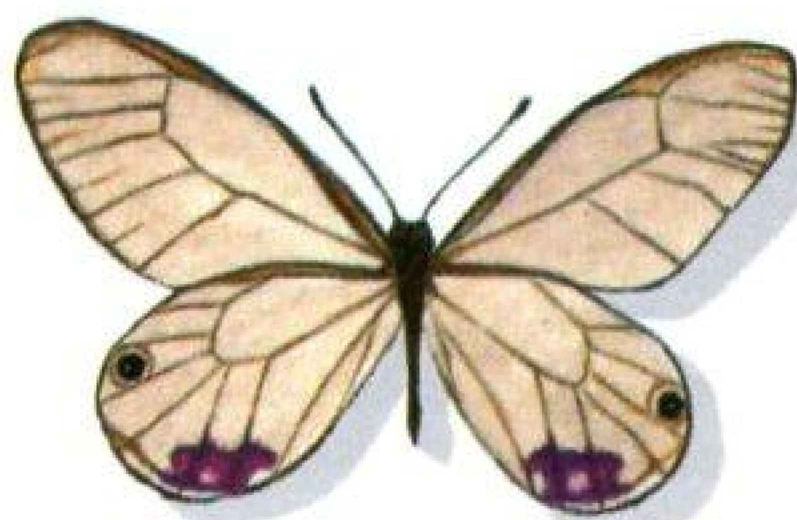
Eunica sophonisba



Biblis hyperia



Haetera macleannania



Cithaerias esmeralda

poco, adaptándose cada vez mejor a su ambiente. En esto consiste la selección natural. Las presiones ambientales, como la competencia por los recursos, hacen que ciertos individuos sean «seleccionados» entre los demás de la especie. En este sentido, la selección significa simplemente que ciertos individuos poseen características hereditarias que facilitan su supervivencia y les confieren más posibilidades de reproducirse en un ambiente dado, en comparación con los otros individuos de su especie.

Darwin tomó como modelo la selección artificial, practicada por los agricultores y criadores de animales. Seleccionando ciertas características concretas, generación tras generación, se puede obtener un *bull-dog* o un lebrel a partir de un animal similar a un lobo, o transformar una escuálida gramínea silvestre en trigo de espigas cargadas. Estudiando razas de animales domésticos, Darwin pudo establecer una analogía directa entre esta selección artificial y la que se produce a consecuencia de la competición en los ambientes naturales.

Darwin tenía ya esbozadas todas estas ideas en 1838, pero no las publicó hasta veinte años más tarde. Una de las razones del retraso pudo ser el deseo de apuntalar todas sus hipótesis con datos, para evitar que corrieran la suerte de las teorías de Lamarck. Otra razón fue, casi con seguridad, el temor a la conmoción que su teoría iba a provocar, sin duda alguna, en los ambientes sociales y religiosos de su época. Darwin era consciente de las implicaciones filosóficas de una teoría sobre el cambio evolutivo por selección natural; sabía que eliminaba la figura de Dios del paisaje de la vida y que situaba a la especie humana como un integrante más de dicho paisaje, un mero producto temporal de la línea evolutiva de los simios.

Este bloqueo, motivado por su deseo de rigor científico y por su temor a las consecuencias públicas de la revelación, se rompió por fin ante la posibilidad de que Alfred Wallace se llevara el mérito de su obra.

Wallace, nacido en 1823, era 14 años más joven que Darwin. Era un naturalista de gran prestigio y coleccionista profesional, no un aficionado con dinero como Darwin. Realizó viajes muy provechosos a la Amazonia y el Extremo Oriente para recolectar ejemplares y se ganaba la vida vendiendo parte de sus colecciones. Durante su estancia en las Indias Orientales tuvo una especie de inspiración acerca de la naturaleza de la vida y elaboró una teoría de la selección natural que no difería mucho de los trabajos, aún sin publicar, de Darwin.

Según sus palabras, «las especies tienden a alejarse indefinidamente de su diseño original».

Wallace era un gran admirador de Darwin y se había sentido inspirado por el relato del viaje del *Beagle*, de manera que envió a su héroe un resumen de sus teoría sobre el cambio de las especies a lo largo del tiempo. Darwin quedó estupefacto. El trabajo de Wallace parecía usurpar todos sus años de laboriosa recogida de datos y análisis de los mismos. Gracias a la mediación de los científicos amigos de Darwin, entre ellos Joseph Hooker y Charles Lyell, se llegó a un compromiso, acordándose que Wallace y Darwin presentaran sus trabajos en la misma sesión de la Sociedad Linneana de Londres.

Al año siguiente, 1859, Darwin publicó *El origen de las especies por la selección natural*, un detallado volumen sobre la evidencia del cambio evolutivo. El extraordinario éxito del libro hizo que a Darwin se le considerara como el padre de la teoría evolucionista y a Wallace como una figura circunstancial, pero la realidad era muy diferente.

A los pocos años de la publicación del libro de Darwin, el hecho básico de la evolución de los seres vivos había quedado firmemente establecido, a pesar de los continuos ataques de los que se aferraban a la tranquilizadora visión predarwinista del mundo. Sin embargo, se tardó en aceptar la idea de la selección natural, derivada de la herencia de los caracteres ventajosos. Hubo que esperar a mediados del siglo XX para que las bases genéticas de la herencia, basadas en los experimentos de cría de plantas realizados por Gregor Mendel (1822-84), se convirtieran en una ciencia capaz de explicar la variación y su herencia en el contexto de una población de individuos que va evolucionando.

En los años cincuenta se llegó a un consenso neodarwinista, que ligaba firmemente la genética al cambio evolutivo. Los posteriores avances de la biología molecular ampliaron aún más el consenso. Cuando se conoce la escala molecular de la información genética —que cada célula contiene en sus genes miles de millones de instrucciones diferentes—, resulta evidente que los cambios hereditarios son casi inevitables.

Cada vez que un animal o una planta se reproducen, sus genes tienen que copiarse. Este proceso se realiza en varias etapas y es imposible que se lleve a cabo sin cometer jamás ningún error. Estos errores en el copiado de genes constituyen la materia prima del cambio evolutivo. De manera similar, resulta evidente que los organismos se van adaptando a su ambiente mediante cambios evolutivos.

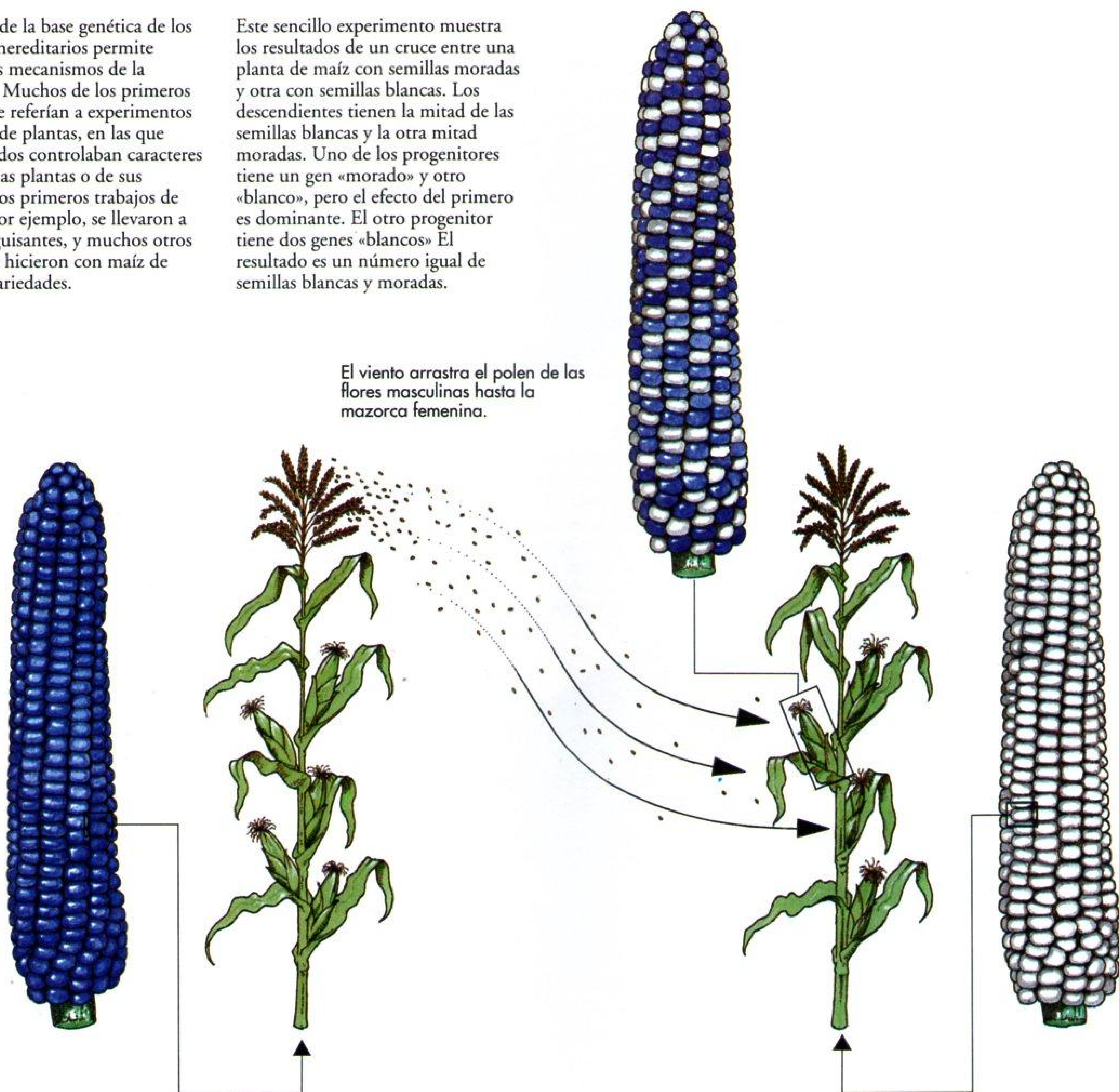
Los cambios genéticos, que se podrían considerar como errores fortuitos, sólo se

transmitirán a la siguiente generación si los organismos que los presentan logran reproducirse. Si los genes alterados representan alguna ventaja que aumente las posibilidades de llegar a reproducirse, seguirán apareciendo en la siguiente generación. En cambio, los genes que reduzcan el éxito reproductivo sufrirán el efecto contrario. Así pues, existe una relación directa entre el destino de un cambio genético y su efecto sobre la reproducción. Esta relación conserva los cambios que resulten ventajosos con respecto a un mundo exterior que cambia constantemente.

Vistas desde nuestra perspectiva, a finales del siglo XX, las ideas evolutivas pueden considerarse una base fundamental del conocimiento. El concepto de la evolución lo impregna todo y se manifiesta en cada faceta de las modernas ciencias de la vida, desde la biología molecular a la antropología. Esta ubicuidad hace difícil aislar para su estudio un tema llamado evolución; la evolución ha dejado de ser una teoría aparte para convertirse en un aspecto inseparable de todas nuestras ideas acerca de los seres vivos en este planeta.

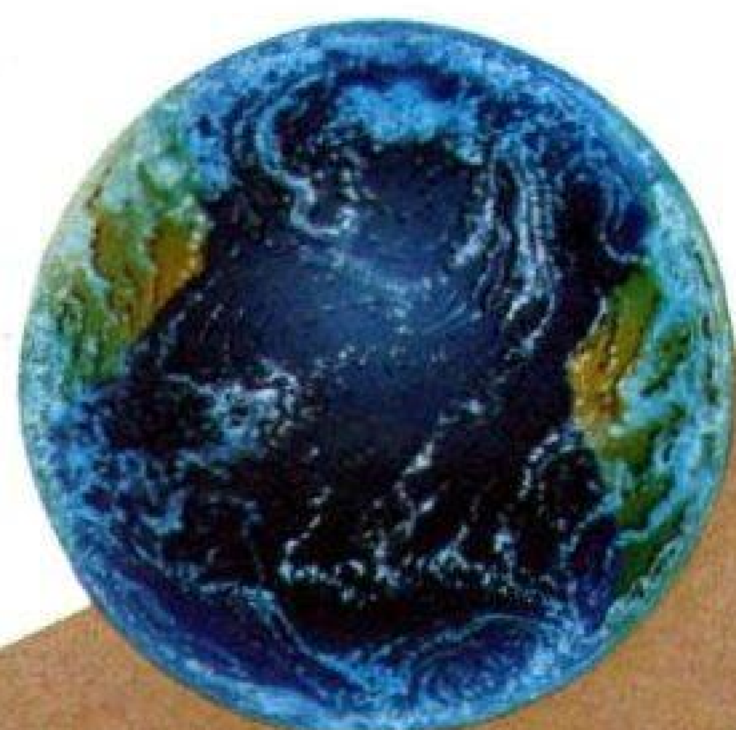
El análisis de la base genética de los caracteres hereditarios permite explicar los mecanismos de la evolución. Muchos de los primeros ejemplos se referían a experimentos de cultivo de plantas, en las que genes aislados controlaban caracteres obvios de las plantas o de sus semillas. Los primeros trabajos de Mendel, por ejemplo, se llevaron a cabo con guisantes, y muchos otros estudios se hicieron con maíz de distintas variedades.

Este sencillo experimento muestra los resultados de un cruce entre una planta de maíz con semillas moradas y otra con semillas blancas. Los descendientes tienen la mitad de las semillas blancas y la otra mitad moradas. Uno de los progenitores tiene un gen «morado» y otro «blanco», pero el efecto del primero es dominante. El otro progenitor tiene dos genes «blancos» El resultado es un número igual de semillas blancas y moradas.





ESCALA TEMPORAL DE LA VIDA EN LA TIERRA



Las algas verde-azuladas, lo mismo que las plantas modernas, desprenden oxígeno durante la fotosíntesis.

Los estromatolitos son fósiles con aspecto de piedras, que se formaron por sustitución mineral en las masas estratificadas de bacterias y algas verde-azuladas marinas.

Estromatolitos

Hace 2.000 millones de años

Algas verde-azuladas

La atmósfera de la Tierra se fue volviendo aerobia poco a poco, debido al oxígeno desprendido por las algas verde-azuladas fotosintéticas.



Nuestro sistema solar



La Vía Láctea

Hace 6.000 millones de años

Hace 7.000 millones de años

Hace 8.000 millones de años

Hace 9.000 millones de años

Primeras células eucarióticas

Hace 850 millones de años existían ya agrupaciones sencillas de células con núcleo (procarióticas).

Hace 5.000 millones de años

Se cree que la Tierra se formó por un proceso de agregación alrededor del Sol, en los primeros tiempos del sistema solar.

Hace 1.000 millones de años

Hacia finales del Precámbrico —el largo período comprendido entre la formación de la Tierra y el comienzo del Cámbrico— aparecieron animales más grandes y complicados. Los fósiles más conocidos de este período se encontraron en los montes Ediacara de Australia, pero en otras muchas partes del mundo se han descubierto fósiles similares. Las afinidades evolutivas de estos primitivos metazoos (animales pluricelulares) no están muy claras. Tal vez sean formas primitivas de grupos zoológicos modernos, como los pennatuláceos y los gusanos anélidos, pero también es posible que no tengan relación alguna con los grupos modernos.

Cámbrico
Hace 570 millones de años
En esta época se produjo una rápida diversificación de la fauna, apareciendo formas animales bastante complejas, como los moluscos y artrópodos, muchas de ellas con caparazones o exoesqueletos duros.

Ordovícico
Hace 500 millones de años
Todos los animales del Ordovícico eran aún marinos. Especialmente abundantes eran los trilobites, pertenecientes al grupo de los artrópodos.

Silúrico
Hace 440 millones de años
Los principales depredadores de este período eran los grandes escorpiones marinos, pero empezaban a aparecer los primeros peces con mandíbulas. La tierra empezó a ser colonizada por las plantas y por animales invertebrados.



Animal del Ediacario (*Tribrachidium*)



Invertebrado de las pizarras de Burgess (*Aysheaia*)



Trilobite (*Encrinurus*)

Escorpión marino (*Euriptérido*)

La Tierra se formó hace unos 4.500 millones de años. Han existido muchas controversias acerca de la verdadera edad de nuestro planeta, pero durante las últimas décadas, gracias a una combinación de técnicas analíticas, basadas en su mayor parte en la medición de las cantidades de diferentes isótopos atómicos en las rocas terrestres, se ha podido llegar a un consenso. Todos los planetas, satélites, asteroides y demás cuerpos del sistema solar se formaron aproximadamente al mismo tiempo que la Tierra. Las rocas más antiguas que se han encontrado en meteoritos y en la Luna tienen también unos 4.500 millones de años de edad.

La evolución necesita tiempo. Cuando se formó la Tierra, era un planeta sin vida, como los demás que giraban alrededor de nuestro Sol. Tuvieron que transcurrir unos mil millones de años para que aparecieran formas de vida con la suficiente complejidad como para dejar huellas microfósiles en las rocas de la época. Pero los verdaderos orígenes de la vida —la aparición de entidades químicas capaces de reproducirse— debieron tener lugar mucho antes. La vida actual en la Tierra es el resultado de 3.500 ó 4.000 millones de años de evolución.

Todas las formas primitivas de vida celular consistían en células sin núcleo (procarióticas) que vivían en el agua. Entre ellas figuraban varios tipos de bacterias.

Hace 3.000 millones de años

Los fragmentos sólidos —partículas metálicas y rocosas— que giraban en la misma órbita se fueron agregando bajo la influencia de la gravedad.

El calor radiactivo fundió el núcleo del planeta. Los materiales metálicos más densos se depositaron en el centro, y los rocosos, más ligeros, en la superficie.

La superficie de la Tierra se enfrió, formando una corteza, constantemente bombardeada por meteoritos. Empezó a formarse la atmósfera.

Devónico
Hace 410 millones de años
En los mares se produce una notable diversificación de los peces con y sin mandíbulas. Los anfibios comienzan a conquistar la tierra firme y aparecen los primeros insectos.

Pez óseo primitivo
(*Thursius*)

Equiseto terrestre
(*Calamites*)

Carbonífero
Hace 365 millones de años
Gran parte de la Tierra estaba cubierta por bosques pantanosos, formados por grandes equisetos, licopodios y gimnospermas. Los primeros reptiles, de pequeño tamaño, evolucionan al mismo tiempo que los insectos voladores, como las cucarachas y libélulas.

Pérmico
Hace 290 millones de años
En la flora terrestre predominan las coníferas. Los reptiles empiezan a sustituir a los anfibios como animales terrestres dominantes. Se extinguen los trilobites y los escorpiones marinos.

Anfibio primitivo
(*Seymouria*)

Triásico
Hace 245 millones de años
Los reptiles dominan el mundo. En los mares nadan tortugas e ictiosaurios; los pterosaurios surcan los aires, y en tierra firme aparecen los primeros dinosaurios y los primeros mamíferos.

Reptil primitivo
(*Askeptosaurus*)

Primera ave conocida
(*Archaeopteryx*)

Jurásico
Hace 210 millones de años
La Tierra se cubre de cicadíneas, helechos y helechos arborescentes. Evolucionan numerosos tipos de dinosaurios herbívoros y carnívoros, y aparece la primera ave, el *Archaeopteryx*. En los mares abundan los peces óseos y cartilaginosos, además de reptiles marinos y ammonites (moluscos con concha espiral).

Cretácico
Hace 140 millones de años
En tierra firme evolucionan las plantas con flores, así como las mariposas y abejas que las polinizan. También se desarrollan numerosas especies de dinosaurios herbívoros y carnívoros.

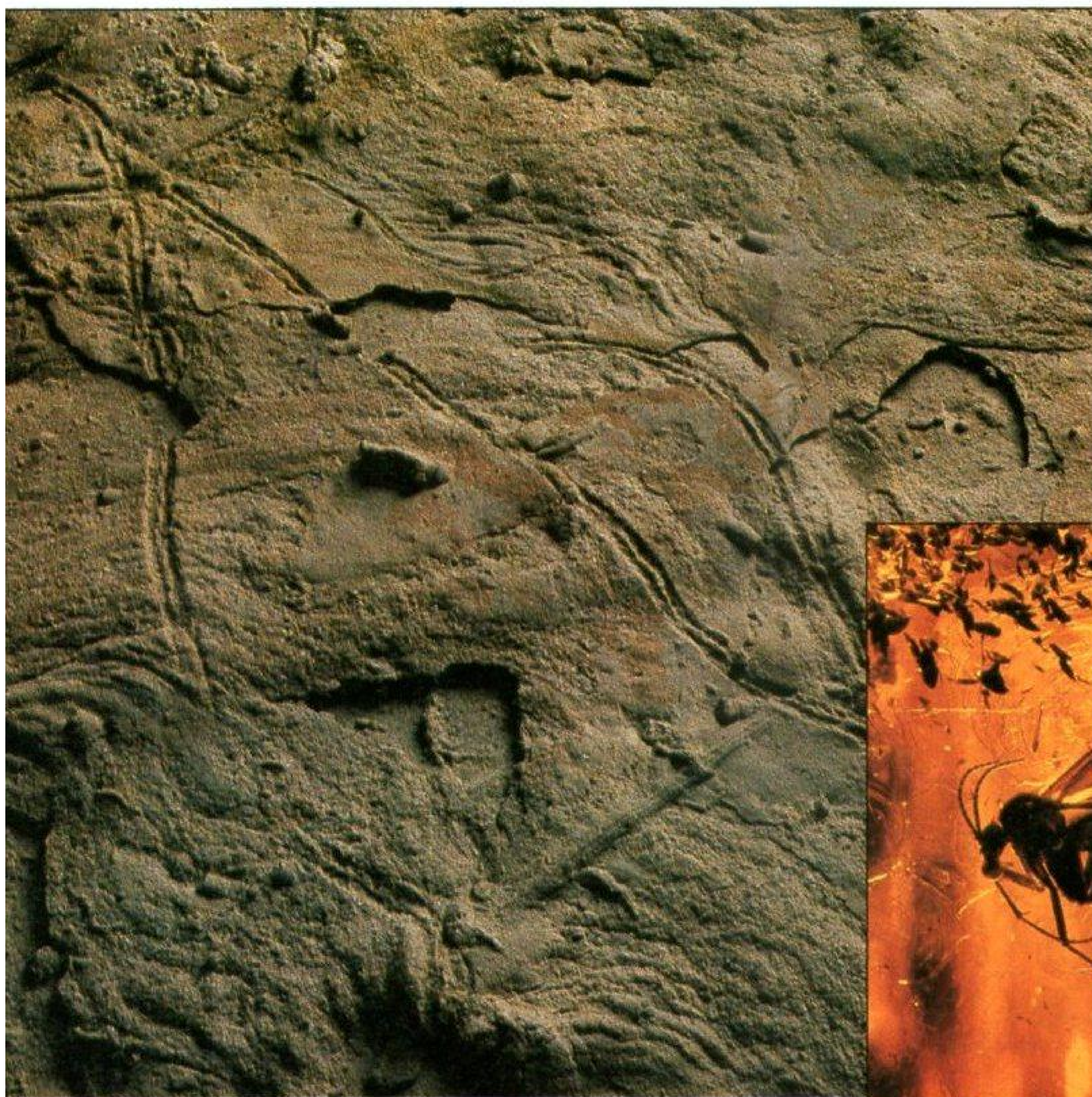
Dinosaurio carnívoro
(*Tyrannosaurus*)

Terciario
Hace 65 millones de años
Tras la desaparición de los grandes reptiles terrestres, marinos y aéreos, ocurrida a finales del Cretácico, los mamíferos y las aves se convierten en las formas dominantes.

Cuaternario
Hace 2 millones de años
Los primeros homínidos evolucionan en África, y poco a poco se van expandiendo por todo el mundo.



FÓSILES: EVIDENCIAS DEL PASADO



Estos misteriosos «carriles» encontrados en rocas jurásicas cerca de Dorset, Inglaterra, son las huellas fosilizadas que dejó un crustáceo desconocido hace 200 millones de años. El animal debió caminar sobre fango sedimentario blando, dejando a su paso dos surcos paralelos, que se transformaron en una huella fósil directa.



Estas dos moscas sepultadas para siempre en ámbar fosilizado vivieron hace 30 millones de años. El ámbar se formó a partir de la resina segregada por los árboles, que es pegajosa y actúa como «atrapamoscas», englobando arañas y pequeños insectos. Poco a poco, se fue endureciendo, y los animales atrapados quedaron perfectamente conservados en su tumba transparente.

Los fósiles de huesos, conchas e incluso animales completos convierten en realidad el viaje a través del tiempo. Estudiándolos, podemos «contemplar» el pasado. Cuando se reconoció que aquellas «piedras con formas curiosas» eran verdaderamente lo que parecían ser —los restos petrificados de seres prehistóricos— se hizo evidente su importancia para la historia de la evolución. La Paleontología, o estudio de los fósiles, proporciona respuestas a muchas preguntas fundamentales acerca del proceso evolutivo.

El estudio de los fósiles ha demostrado sin lugar a dudas que los animales que nadaban en los mares primitivos y las plantas que formaban los bosques prehistóricos eran diferentes de las especies actuales. Los fósiles de organismos que ahora ya no existen demuestran que muchas especies se han extinguido. Las secuencias cronológicas de fósiles encontrados en sucesivas capas de roca revelan las pautas de cambio en los distintos grupos de seres vivos.

Uno de los tipos de fósil más conocidos es el hueso fosilizado, es decir, transformado en piedra. La fosilización directa crea una copia mineralizada exacta de una parte del esqueleto de un ser vivo. Montando los huesos fósiles de un dinosaurio gigante, como se hace en los museos, podemos hacernos una idea del tamaño y aspecto de un animal que chapoteaba en los pantanos hace 100 millones de años. Pero los huesos fosilizados no son más que una de las muchas modalidades de fósiles que nos permiten reconstruir el inventario de formas de vida que han existido en nuestro planeta.

Cuanto más dura sea una estructura y más resistente a la descomposición y la deformación, más posibilidades tendrá de conservarse en forma fósil. Entre los fósiles más abundantes figuran, por ejemplo, los dientes de animales vertebrados. También se han encontrado muchos fósiles de invertebrados que, aunque carecían de huesos, poseían caparazones y otras cubiertas duras. Abundan, por ejemplo, las conchas de moluscos bivalvos y los exoesqueletos de placas de varios tipos de equinodermos, como los erizos de mar.

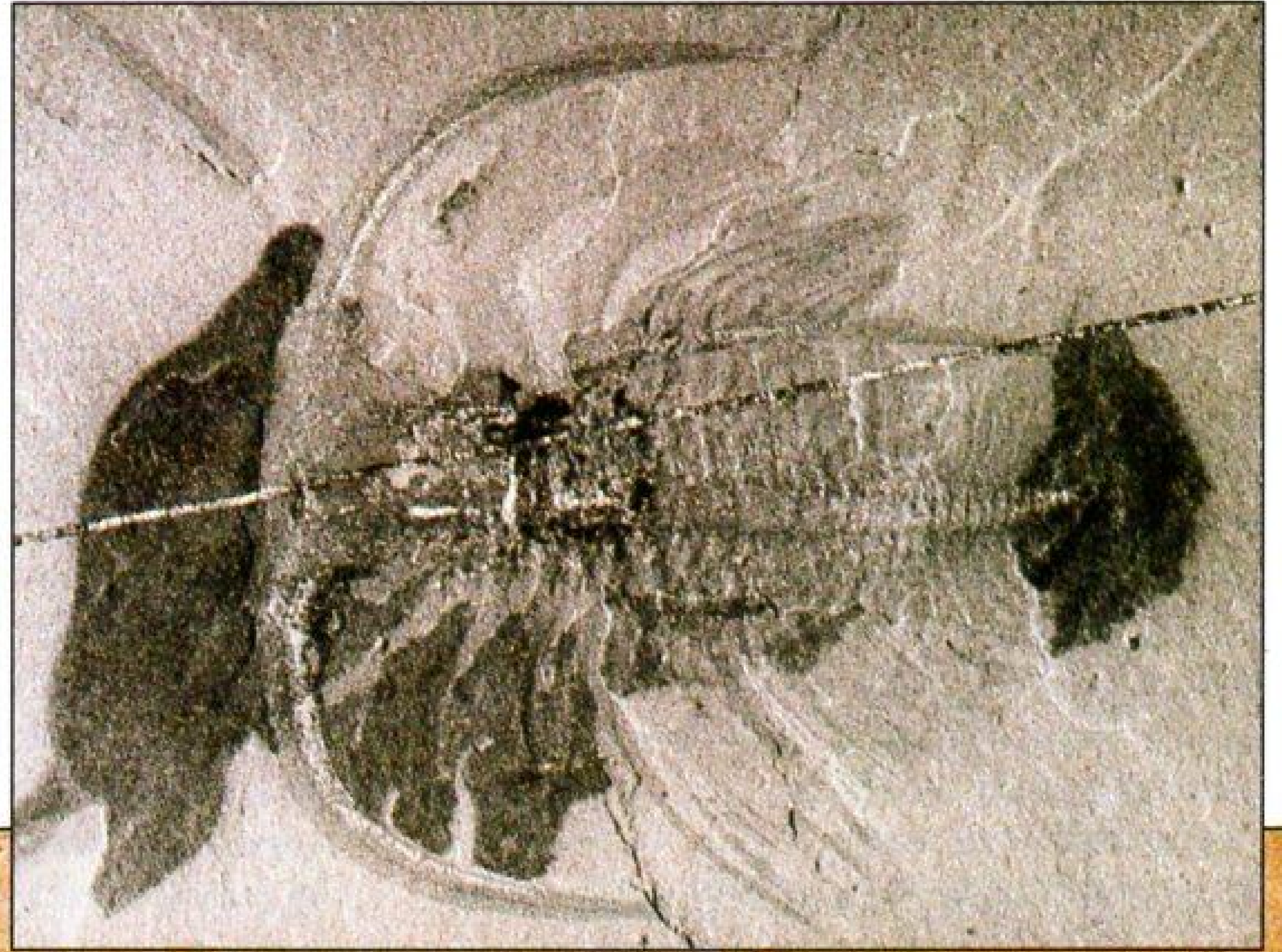
A menos que se deformen por efecto de la presión, el calor u otras fuerzas físicas que actúan sobre las rocas, los fósiles esqueléticos directos conservan más o menos la

forma que presentaban en el organismo vivo del que formaban parte. Pero, además, la roca matriz en la que se encuentra embutido el fósil suele formar una impresión o molde negativo del fósil directo. Estas impresiones negativas pueden resultar tan útiles como los propios fósiles positivos, ya que aportan detalles acerca de la apariencia superficial de un animal o planta.

Existen otras clases de fósiles. Los insectos conservados en ámbar constituyen uno de los ejemplos más espectaculares. El ámbar es un nódulo rocoso transparente, producido por la petrificación de la resina de los árboles (en especial, las coníferas). Los insectos, arañas y otros animales pequeños pueden quedar atrapados en la resina, donde apenas si sufren descomposición; y si la resina fosiliza, transformándose en ámbar, quedan perfectamente conservados.

Las huellas fósiles no corresponden a restos de organismos, sino que se trata de las impresiones dejadas por túneles, tubos de gusanos, madrigueras o huellas de animales en sedimentos blandos, que después se transformaron en roca. Pueden variar desde las delicadas marcas dejadas en la arena por un cangrejo hasta las gigantescas pisadas de un dinosaurio en el barro. Estas huellas fósiles pueden revelar mucha información acerca del modo de vida de los animales que las dejaron. Por ejemplo, a partir de las huellas de un dinosaurio se puede deducir su modo de andar, la longitud de los pasos y la velocidad con que se movía.

En condiciones excepcionalmente favorables para la fosilización, pueden llegar a fosilizar incluso las partes blandas, y no sólo los huesos y caparazones, con lo que se obtiene una copia muy aceptable del organismo original. Los ejemplos más conocidos se han encontrado en las pizarras cámbricas de Burgess, Columbia Británica (Canadá), y en las calizas litográficas jurásicas de Solenhofen, Baviera (Alemania). En ambos casos, los animales quedaron rápidamente sepultados en sedimentos de grano fino, en circunstancias que impidieron la descomposición microbiana durante el tiempo suficiente para garantizar la conservación sin deformaciones. En algunos artrópodos de las pizarras de Burgess se aprecian hasta las patas y antenas más finas, a pesar de que tienen 500 millones de años de antigüedad. Y en las plumas fosilizadas de la primera ave conocida —el *Archaeopteryx*, de Solenhofen— se ven hasta las impresiones de las diminutas barbas individuales.



Este fósil de *Marrella splendens* tiene más de 500 millones de años y el animal ha quedado perfectamente reconocible, aunque aplastado. El *Marrella* es bastante común en las pizarras de Burgess, Canadá, que contienen abundantes fósiles.

En este fósil de *Archaeopteryx*, la primera ave conocida, se aprecia hasta el último hueso del cuerpo.



CÓMO SE FORMAN LOS FÓSILES

Entre las formas vivas que se han conservado como fósiles figuran desde bacterias unicelulares hasta gigantescos huesos de dinosaurio. Sin embargo, a pesar de su aparente abundancia y diversidad, los fósiles sólo proporcionan un inventario incompleto del pasado de la Tierra. Si todo el registro fósil fuera un libro, a dicho libro le faltarían capítulos enteros, además de numerosas páginas, párrafos y palabras aisladas.

Algunos organismos, como los animales de cuerpo blando sin esqueletos ni caparazones, no fosilizan prácticamente nunca. En consecuencia, en el registro fósil hay una notable ausencia de amebas, ciliados, gusanos platelmintos, babosas de mar, pólipos y medusas, lo cual resulta muy lamentable, ya que todo hace suponer que los animales pertenecientes a estos grupos desempeñaron un papel trascendental en las primeras fases de la evolución animal, cuando los organismos pluricelulares comenzaron a diversificarse. Por la misma razón escaparon a la fosilización las plantas y hongos sin partes leñosas duras. Esto explica por qué existen tantos fósiles de las partes leñosas de las plantas y tan pocos de las flores.

Además, para que pueda formarse un fósil, el organismo debe morir en circunstancias que permitan que quede enterrado en los sedimentos y se conserve el tiempo suficiente. Dichos sedimentos —fangos marinos, fondos arenosos o arcillosos de ríos, pantanos y lagunas, o arena arrastrada por el viento en desiertos y sistemas de dunas— son la materia prima a partir de la cual se forman las rocas sedimentarias, y en estas rocas es donde se encuentra la mayoría de los fósiles.

Así pues, las posibilidades de que se formen fósiles varían enormemente. La fosilización es mucho más probable en sistemas marinos y en lagos o pantanos que en los hábitats terrestres. Es muy raro que se formen fósiles en las praderas y bosques lluviosos. Casi todos los animales que mueren en estos ecosistemas son rápidamente devorados o descompuestos, sin que tengan oportunidad de quedar sepultados en sedimentos.

Y aun cuando se hayan formado fósiles, lo más probable es que nunca lleguen a formar parte del registro fósil disponible para el estudio. Casi todas las rocas sedimentarias acaban por erosionarse, o se alteran por efecto del calor y la presión, transformándose en rocas metamórficas, o se funden por completo al ser empujadas hacia abajo por los movimientos de las placas que componen la corteza terrestre. Todos estos procesos destruyen los fósiles. Por otra parte, es muy poco probable que se lleguen a encontrar los fósiles contenidos en rocas sedimentarias enterradas a varios kilómetros de profundidad. Los métodos normales sólo permiten recuperar fósiles en rocas sedimentarias sin erosionar y cerca de la superficie.

Cuando se forman fósiles en las rocas sedimentarias, los restos de animales o plantas se transforman en copias petrificadas. La composición química de un fósil atraviesa varias fases y varía según el tipo de fósil. Un ejemplo típico es la fosilización de un molusco marino. El cuerpo del animal se descompone, y su concha queda enterrada en sedimentos finos, donde comienza su transformación química. La concha está compuesta por cristales de carbonato cálcico mezclados con un cemento proteínico sintetizado por el molusco vivo. Los microorganismos pueden penetrar por los diminutos poros de la concha, descomponiendo poco a poco la proteína que contiene.

En estos espacios penetran también minerales, que empiezan a acumularse sobre los cristales que componen la concha.

Este proceso consolida la estructura existente, haciéndola más densa y compacta. Si para entonces los sedimentos han quedado cubiertos por otros y comienza el proceso de compresión y alteración química que los transformará en roca, el fósil en desarrollo experimentará cambios similares: también puede resultar comprimido y transformarse en una roca similar al material matriz en el que está embutido.

Con el tiempo, el agua ligeramente ácida que se filtra a través de las rocas porosas puede acabar por disolver la concha de carbonato cálcico; pero esta disolución no significa necesariamente la desaparición del fósil, sino que puede ser el primer paso de otro tipo de transformación. Si el fósil original deja una impresión negativa en la roca que lo rodea, el hueco o molde se puede rellenar con un tipo completamente diferente de roca o mineral. Algunos de los fósiles más antiguos y detallados son el resultado del relleno de moldes con sílice o de la transformación de las partes blandas en piritas de hierro.



El ammonite vivo, dentro de su concha calcárea.



Ammonite muerto, caído sobre los sedimentos del fondo marino. El cuerpo blando se descompone.

Los ammonites, parientes de los actuales calamares, eran moluscos marinos con conchas en espiral, que abundaron durante el período Jurásico, hace 200 millones de años.

Medio molde, con la impresión fósil negativa del ammonite.

Fosilización directa de la concha. No queda rastro del color original, pero se aprecian perfectamente los relieves de la superficie.

Suturas entre las cámaras.

Nuevas capas de sedimentos cubren el fósil en proceso de formación.

Una vez cubierta por los sedimentos, la vaina exterior de la concha se descompuso, y la cámara interior se llenó de sedimentos de grano fino. Con el tiempo, la concha se fue consolidando con minerales disueltos, formándose un fósil directo y dos medios moldes en la roca que lo rodeaba, que presentan impresiones en negativo de la superficie de la concha.

La acidez desintegra la concha, dejando al descubierto el molde interno de las cámaras.

La concha calcárea podría también haberse disuelto, dejando un molde relleno con material más resistente, en el que se aprecian las suturas onduladas internas que separan las cámaras de la concha.

Minerales disueltos se incorporan a la estructura fósil.

La cámara externa de la concha se llena de sedimento. Concha y sedimento empiezan a transformarse en roca.

Concha calcárea cubierta de sedimentos.

Nueva capa de sedimentos sobre el fósil en proceso de formación.

Después de morir, el cuerpo blando del ammonite se descompuso con rapidez. La concha tenía varias cámaras internas cerradas y una cámara exterior abierta, que era la que contenía el cuerpo del animal vivo.

Las cámaras interiores de este ammonite fósil (*derecha*) se rellenaron con calcita translúcida (una forma cristalizada del carbonato cálcico). La cámara exterior, que alojaba el cuerpo del animal vivo, debió rellenarse en una etapa anterior con sedimentos más bastos, en los que había quedado enterrada la concha.





LA INTERPRETACIÓN DE LAS PRUEBAS

Los fósiles pueden contar la historia de la vida en el pasado; pero dicha historia debe interpretarse con mucho cuidado, porque los fósiles no siempre son lo que parecen y precisan un análisis muy concienzudo para que se puedan entender debidamente todas las implicaciones de su forma.

El proceso de interpretación resulta mucho más sencillo cuando el fósil está claramente emparentado, al nivel que sea, con algún organismo que todavía exista. La comparación con un organismo vivo puede ayudar a «vestir» un esqueleto fósil con las partes blandas que no fosilizaron. Por ejemplo, en los yacimientos pleistocénicos de Turkana, Africa oriental, se han encontrado muchas conchas fósiles directamente emparentadas con los actuales caracoles del género *Melanoides*, que viven en aguas dulces tropicales.

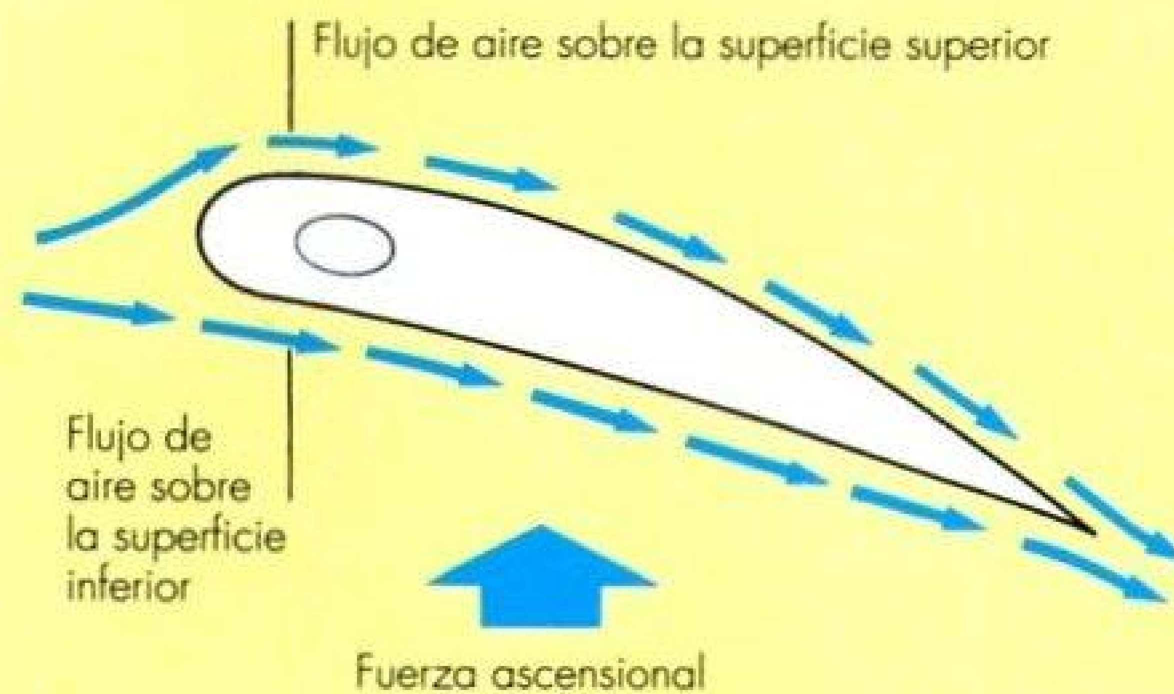
Los ammonites, en cambio, no tienen parientes vivos tan cercanos. Estos prolíficos cefalópodos marinos se extinguieron hace 65 millones de años, al mismo tiempo que los dinosaurios. Se han encontrado numerosos fósiles de sus conchas en espiral, muy bien conservados, pero faltan por completo las partes blandas. Aun así, se pueden reconstruir con cierta seguridad, porque el actual *Nautilus* pertenece a un grupo de animales que fueron los precursores evolutivos de los ammonites. Estudiando el cuerpo del *Nautilus* se puede aprender mucho acerca de los ammonites. Ambos poseen una concha dividida en numerosas cámaras, con un órgano tubular llamado sifón, que permite controlar la densidad del cuerpo en el agua. Probablemente, los ammonites tenían tentáculos en la cabeza para capturar su alimento, lo mismo que el *Nautilus*.

Con los fósiles más antiguos, así como con los que no están claramente emparentados con ninguna forma moderna, la interpretación puede resultar más difícil y arriesgada. Durante los últimos 150 años se han hecho interpretaciones que luego, al aumentar los conocimientos o encontrarse fósiles más esclarecedores, resultaron completamente erróneas. Lo que antes se creía que era un cuerno del dinosaurio *Iguanodon* ha resultado ser un pulgar largo y puntiagudo. La reconstrucción del *Iguanodon* que se realizó en el período victoriano y todavía se exhibe en el parque del Crystal Palace ha perpetuado el error hasta nuestros días.

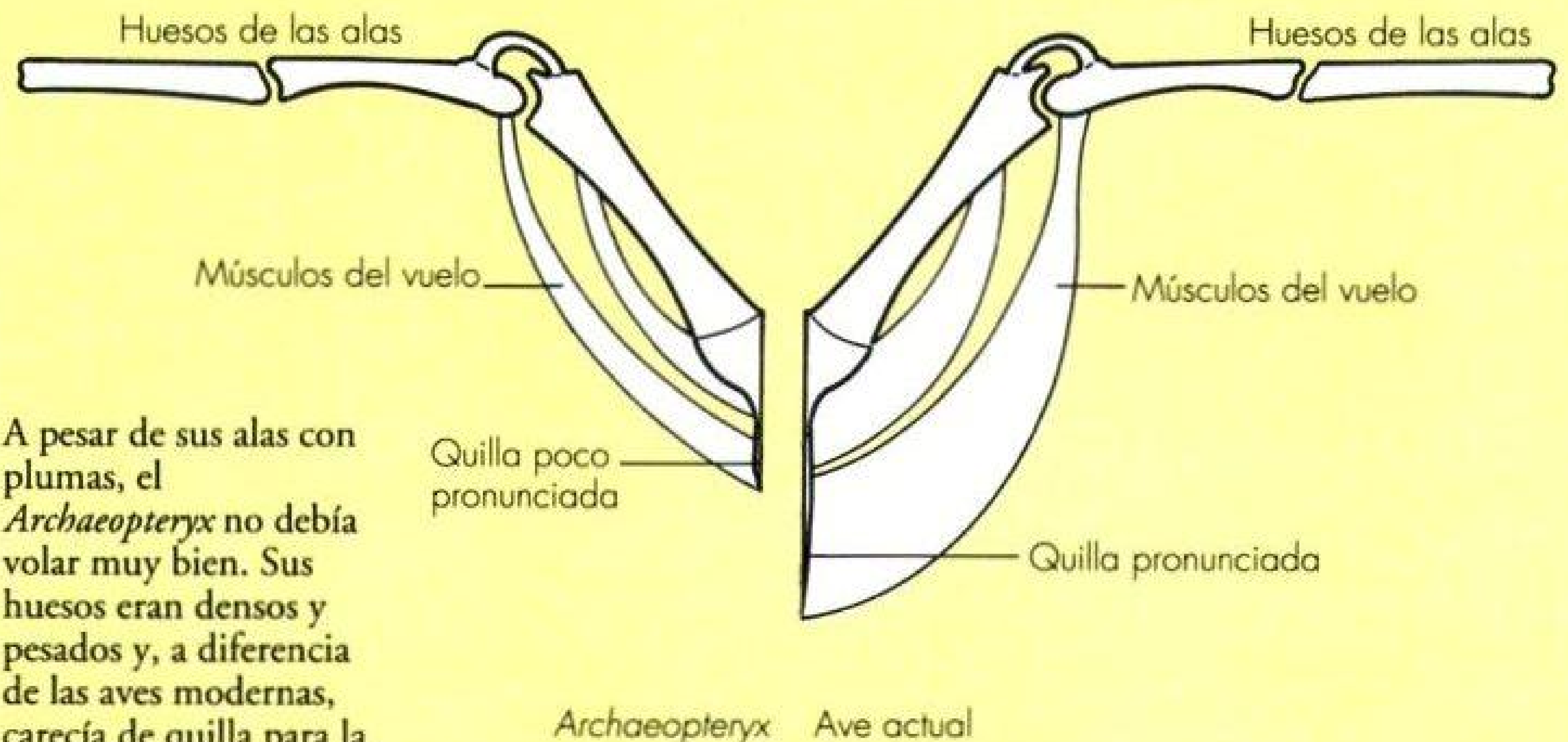
Otro enigma es el invertebrado fósil *Hallucigenia*, que vivió hace 550 millones



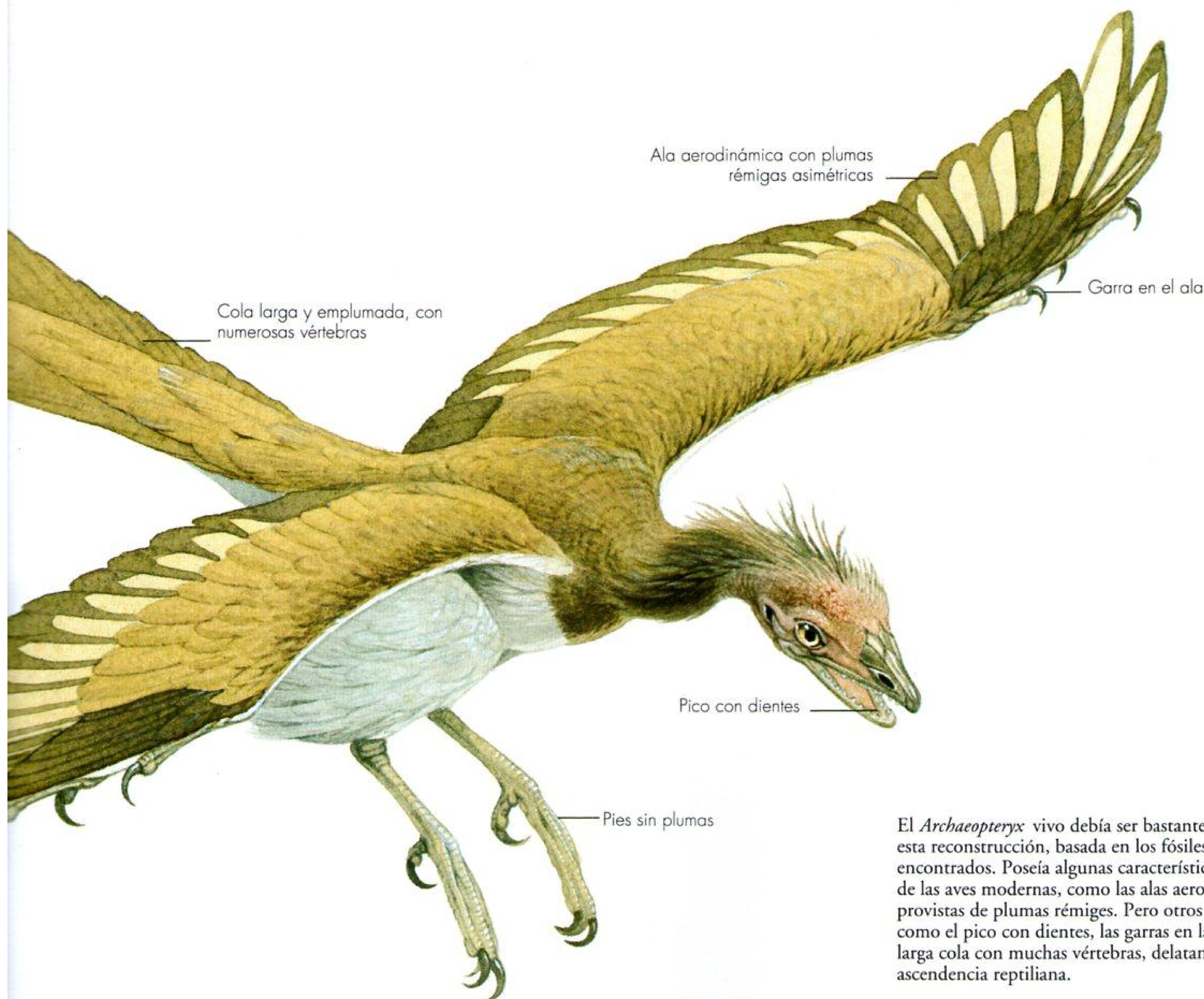
Esta simple pluma fue el primer resto fósil del *Archaeopteryx* que se encontró en 1860. Se parece mucho a las plumas de las alas de un ave actual con barbas muy finas que salen de un eje o raquis. Como en todas las plumas primarias, el eje está en posición asimétrica.



Lo mismo que las aves modernas, el *Archaeopteryx* tenía plumas asimétricas, lo que demuestra que podía volar. La forma curva de la pluma asimétrica proporciona fuerza ascensional para el vuelo, porque el recorrido del aire sobre la superficie superior de la pluma es más largo que en la superficie inferior, lo cual provoca una diferencia de presiones entre las dos caras de la pluma, que es la causa de la fuerza ascensional.



A pesar de sus alas con plumas, el *Archaeopteryx* no debía volar muy bien. Sus huesos eran densos y pesados y, a diferencia de las aves modernas, carecía de quilla para la inserción de músculos potentes para el vuelo.



El *Archaeopteryx* vivo debía ser bastante parecido a esta reconstrucción, basada en los fósiles encontrados. Poseía algunas características propias de las aves modernas, como las alas aerodinámicas provistas de plumas rémiges. Pero otros rasgos, como el pico con dientes, las garras en las alas y la larga cola con muchas vértebras, delatan su ascendencia reptiliana.

de años y cuyos restos se han encontrado en las pizarras cámbricas de Burgess. Cuando se describió por primera vez, se pensó que pertenecía a un grupo de animales primitivos que se extinguió en el Cámbrico; pero los trabajos posteriores y los nuevos hallazgos de fósiles en mejor estado han revelado que la interpretación inicial había invertido la posición del animal: lo que se tomó por apéndices de apoyo resultó ser una cresta de espinas a lo largo del dorso. Pero además, ahora se cree que, lejos de pertenecer a un grupo completamente extinguido, el *Hallucigenia* y sus parientes fueron formas primitivas de los onicóforos o «gusanos de terciopelo», de los que aún viven unas 70 especies (pp. 30-31).

Por lo general, la forma exacta de los huesos y dientes fosilizados puede proporcionar mucha información acerca del modo de vida del animal al que pertenecieron. Los huesos presentan salientes o depresiones que indican el tamaño y posición de las inserciones musculares. Si se encuentra un esqueleto fósil completo, estas señales de inserción pueden permitir reconstruir la musculatura del animal y su forma de moverse. Las articulaciones entre los huesos indican la gama de movimientos de una extremidad o una mandíbula. También los dientes presentan características concretas que revelan la dieta de su propietario. Los dientes de un animal piscívoro, un carnívoro y un herbívoro tienen formas específicas, adaptadas a su función.

Es natural que los paleontólogos se entusiasmen cuando encuentran fósiles con restos de comida fosilizada en su interior, que proporcionan información precisa acerca de su dieta. El fósil del dinosaurio carnívoro *Baryonyx*, descubierto recientemente en Inglaterra, tenía en su interior escamas de pescado, que se identificaron como pertenecientes a un *Lepidotes*, un pez de un metro de longitud. Probablemente, el *Baryonyx* utilizaba las largas garras de sus patas delanteras para pescar, de un modo muy similar al que utilizan actualmente los osos grises de Alaska.

Uno de los fósiles más famosos es el *Archaeopteryx*, la primera ave conocida. Se han encontrado hasta ahora seis ejemplares, todos ellos en las calizas de Solenhofen, Alemania, correspondientes al período Jurásico tardío (hace unos 150 millones de años). A partir de estos restos se puede intentar reconstruir el animal completo.



LA ERA MÁS LARGA

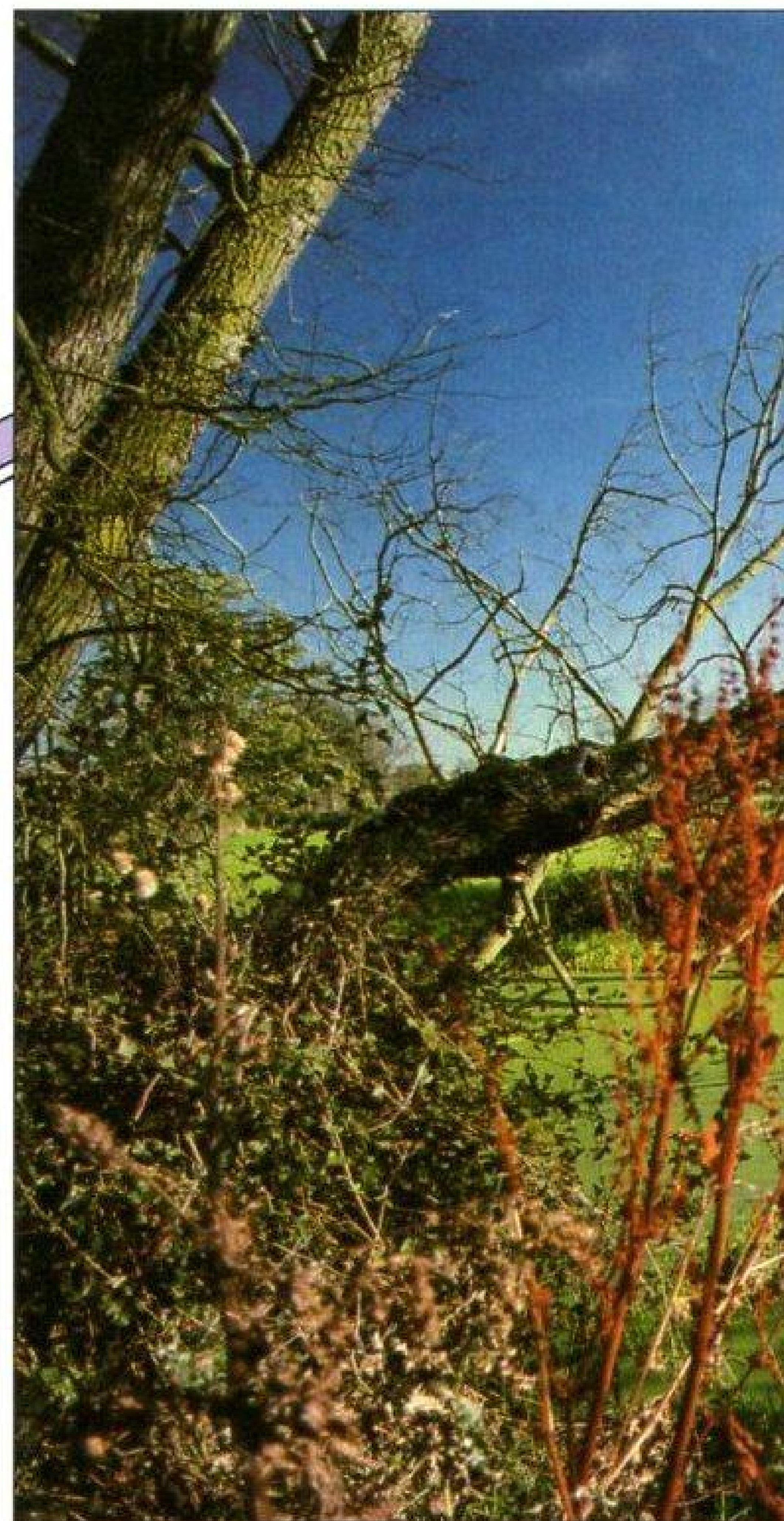
Entre los primeros seres vivos que aparecieron en la Tierra figuraban bacterias y plantas simples, semejantes a las modernas algas verde-azuladas. Pero sus restos fósiles eran demasiado pequeños y difíciles de reconocer, y pasaron inadvertidos para los primeros científicos que comenzaron a buscar fósiles en los siglos XVIII y XIX, y que definieron los períodos geológicos, en una secuencia que aún seguimos utilizando. De los estratos rocosos con fósiles que estos científicos lograron identificar, los más antiguos correspondían al período Cámbrico —así llamado por los montes Cámbricos de Gales—, que comenzó hace unos 570 millones de años.

A la enorme capa de rocas aún más antiguas —que no parecían contener fósiles— se la denominó Precámbrica, y las técnicas modernas de datación han demostrado que esta era fue, con mucho, la más larga. El Precámbrico comenzó con las primeras fases de la consolidación de la corteza terrestre, hace más de 4.000 millones de años. Se han encontrado rocas sedimentarias —que son las que contienen fósiles— de unos 3.800 millones de años de edad, y otras correspondientes a todo el resto del Precámbrico.

A Charles Darwin le preocupaba la aparente inexistencia de fósiles precámbricos. Sabía que las formas de vida del Cámbrico eran ya muy diversas y complicadas (existían ya moluscos y artrópodos), lo cual significaba que antes, en el Precámbrico, tenían que haber existido animales y plantas más simples, pero que no habían fosilizado porque sus cuerpos eran blandos. Darwin tenía razón: aquellos organismos existieron. Y algunos de ellos dejaron fósiles. En las últimas décadas, las nuevas técnicas de búsqueda e interpretación de fósiles en los estratos rocosos de todo el planeta han revelado un mundo precámbrico rebosante de vida.

Los fósiles precámbricos —algunos de los cuales tienen 3.500 millones de años, o quizá más— corresponden a organismos procariontes, cuyas células carecen de núcleo. Formaban cadenas y racimos de células, con una organización semejante a la de las actuales bacterias y algas verde-azuladas. Lo más probable es que vivieran en los sedimentos marinos o sobre ellos, algunos en aguas profundas y otros en aguas menos profundas. En aquellos tiempos apenas había oxígeno en la atmósfera terrestre, de manera que los organismos vivos tenían que ser anaerobios (es decir, no necesitaban oxígeno).

Por lo que sabemos, parece que después de la aparición de las células procarióticas, hace unos 3.800 millones de años, el ritmo de cambio evolutivo fue lentísimo durante más de 2.000 millones de años. Ni se alteró



La atmósfera primitiva de la Tierra se componía de dióxido de carbono, nitrógeno y pequeñas cantidades de hidrógeno.

A principios del Precámbrico, la proporción de nitrógeno en la atmósfera fue aumentando, hasta superar la de dióxido de carbono.

Al ser un gas ligero, el hidrógeno no tardó en perderse en el espacio, quedando en la atmósfera cantidades insignificantes.

Hidrógeno

4,5 | 4 | 3,5 | 3

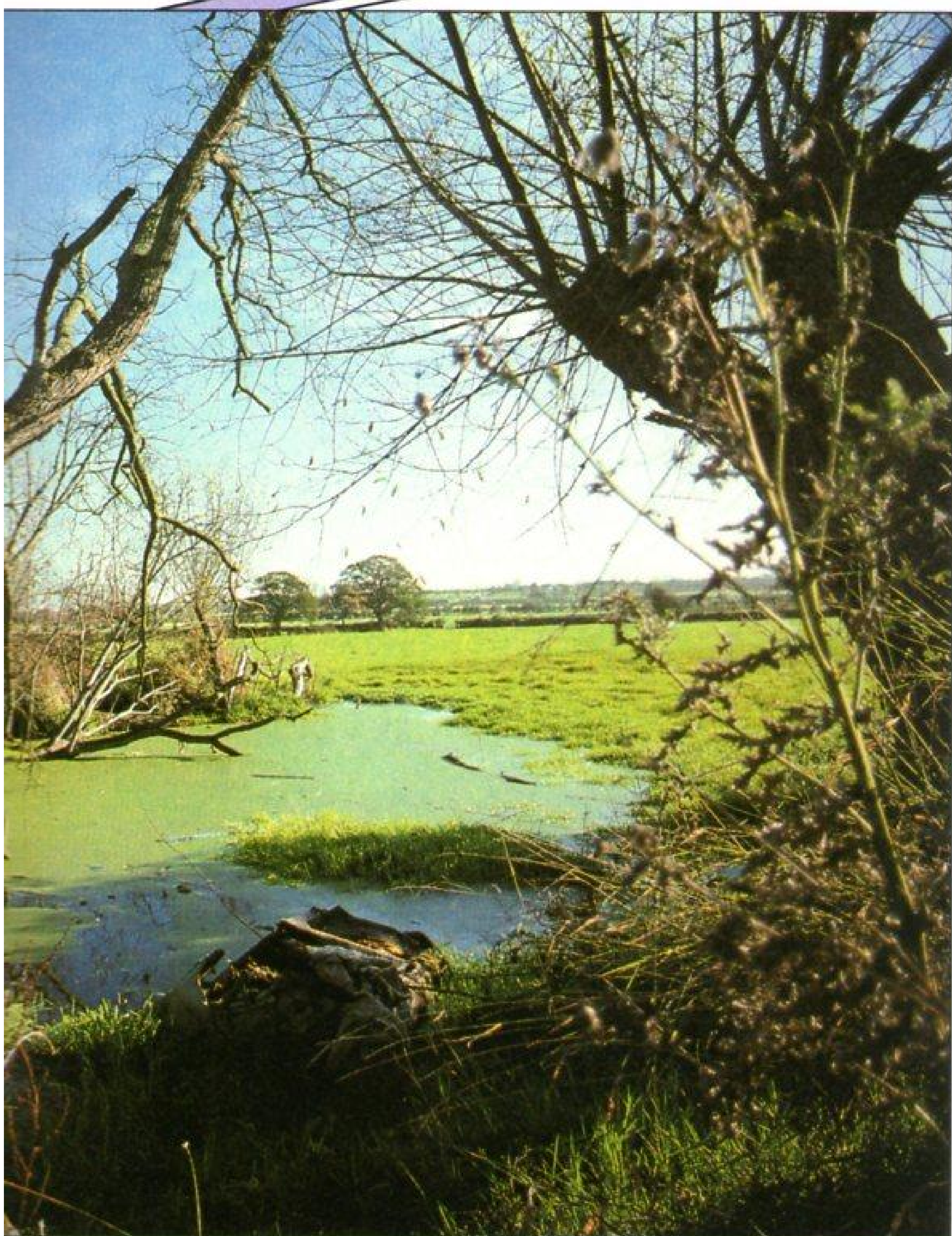
la organización básica de los seres vivos, ni se colonizaron nuevos ambientes, ni se desarrollaron nuevos ecosistemas.

Sin embargo, había un importante agente de cambio en acción, ya que la fotosíntesis de las algas verde-azuladas estaba empezando a desprender oxígeno. Antes de que se empezara a liberar oxígeno como subproducto de la fotosíntesis, prácticamente no existía oxígeno libre en la atmósfera terrestre. El aire contenía nitrógeno, dióxido de carbono y algo de hidrógeno.

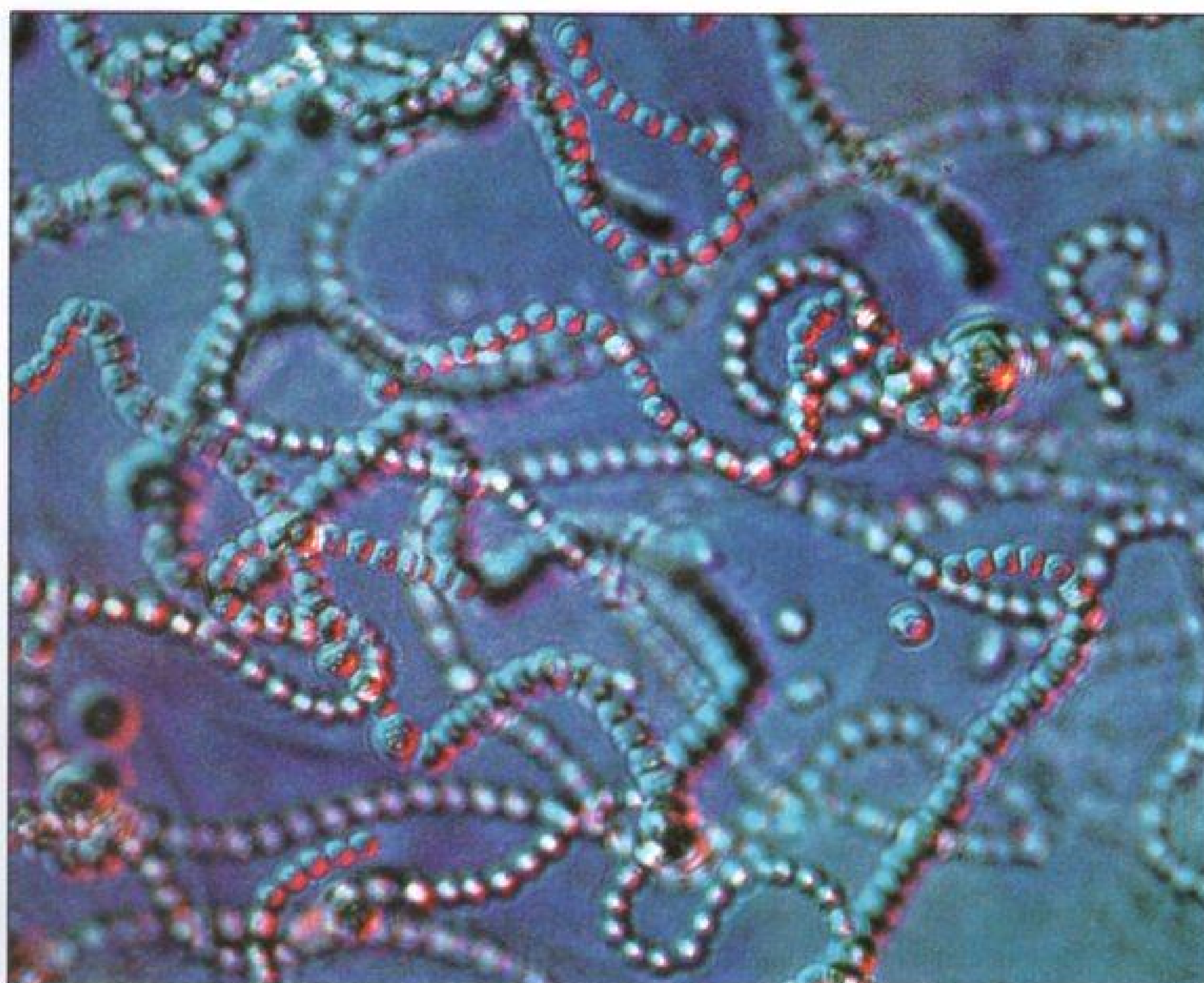
El oxígeno de los mares plagados de estromatolitos cambió el mundo, pero lo hizo muy poco a poco. Al principio, todo el oxígeno producido era absorbido por las rocas y minerales, cuyo carácter químico era muy reducido (carente de oxígeno). Pero, poco a poco, el exceso de oxígeno se fue acumulando en la atmósfera y empezó a ejercer un efecto espectacular sobre las células vivas, que llevaban 2.000 millones de años atrapadas en un callejón evolutivo sin salida.

El oxígeno es un gas peligroso, muy reactivo, y los organismos adaptados a vivir en un mundo anaerobio se encuentran en terrible desventaja si el nivel de oxígeno aumenta, aunque sea muy poco. Todo parece indicar que este aumento inicial del oxígeno atmosférico constituyó un poderoso y revolucionario estímulo para la evolución celular.

Se cree que el aumento del nivel de oxígeno impulsó la evolución de las células eucarióticas o superiores, con un núcleo diferenciado. El caldo de algas verde-azuladas de los mares precámbricos fue la comadrona metabólica de las células superiores y, por tanto, de los animales y los seres humanos.



En estas aguas estancadas se ha formado una «espuma» superficial de algas verde-azuladas y otros vegetales simples. Todas las formas superiores de vida evolucionaron a partir de orígenes tan humildes como éstos.



Una típica alga verde-azulada, del género *Nostoc*, ampliada 1.000 veces.

Porcentaje de la presión atmosférica

100%
90
80
Nitrógeno
70
60
50
40
30
20
Oxígeno
Dióxido de carbono
10

2
1,5
1
Miles de millones de años
0,5

Hace unos 2.000 millones de años, el oxígeno producido por la fotosíntesis de las plantas verdes empezó a convertir la atmósfera en aerobia. En la actualidad, el oxígeno representa la quinta parte de los gases atmosféricos.



LA APARICIÓN DE CÉLULAS COMPLEJAS

El oxígeno es un factor clave de la vida, tanto pasada como presente. La evolución de las células complejas, con núcleo, como las que poseen los animales y plantas actuales, parece haber coincidido con el aumento de los niveles de oxígeno en la atmósfera. Casi todos los expertos en evolución opinan que las condiciones cada vez más aerobias desencadenaron el desarrollo de las células eucarióticas.

El hecho de que estas células posean núcleo es tan sólo un aspecto de su complejidad. También poseen estructuras subcelulares internas, los orgánulos, encargadas de tareas específicas. Con excepción de los ribosomas, que llevan a cabo la síntesis de proteínas, ninguno de estos orgánulos existía en las células procarióticas sin núcleo.

Los orgánulos intracelulares más importantes son, tal vez, la mitocondria, encargada de la respiración aerobia, y el cloroplasto, que realiza la fotosíntesis en condiciones aerobias. La mitocondria proporciona compuestos de alta energía utilizando oxígeno para "quemar" compuestos de carbono, una forma de intercambio de energía mucho más eficiente que la fermentación anaerobia de las células procarióticas (pp. 56-57).

Las únicas pistas acerca de la evolución de estructuras como las mitocondrias y los cloroplastos se encuentran en microfósiles de hace mil millones de años y en la evidencia molecular y biológica de las células actuales. La estructura íntima de los orgánulos de las células eucarióticas y la naturaleza del ADN que se encuentra en dichos orgánulos parecen indicar que estas importantísimas adquisiciones evolutivas no fueron el simple resultado de la lenta acumulación de cambios fortuitos —mutaciones— en los genes de los procariontes ancestrales. Por el contrario, es posible que algunas células incorporaran a su citoplasma células de un tipo diferente, con capacidades metabólicas especiales.

Al principio, estas combinaciones constituían una forma de simbiosis intracelular: dos organismos que vivían juntos en beneficio mutuo. Pero con el tiempo, las organizaciones genética y metabólica de ambas células quedaron ligadas, resultando imposible distinguir dónde acaba una célula y comienza la otra.

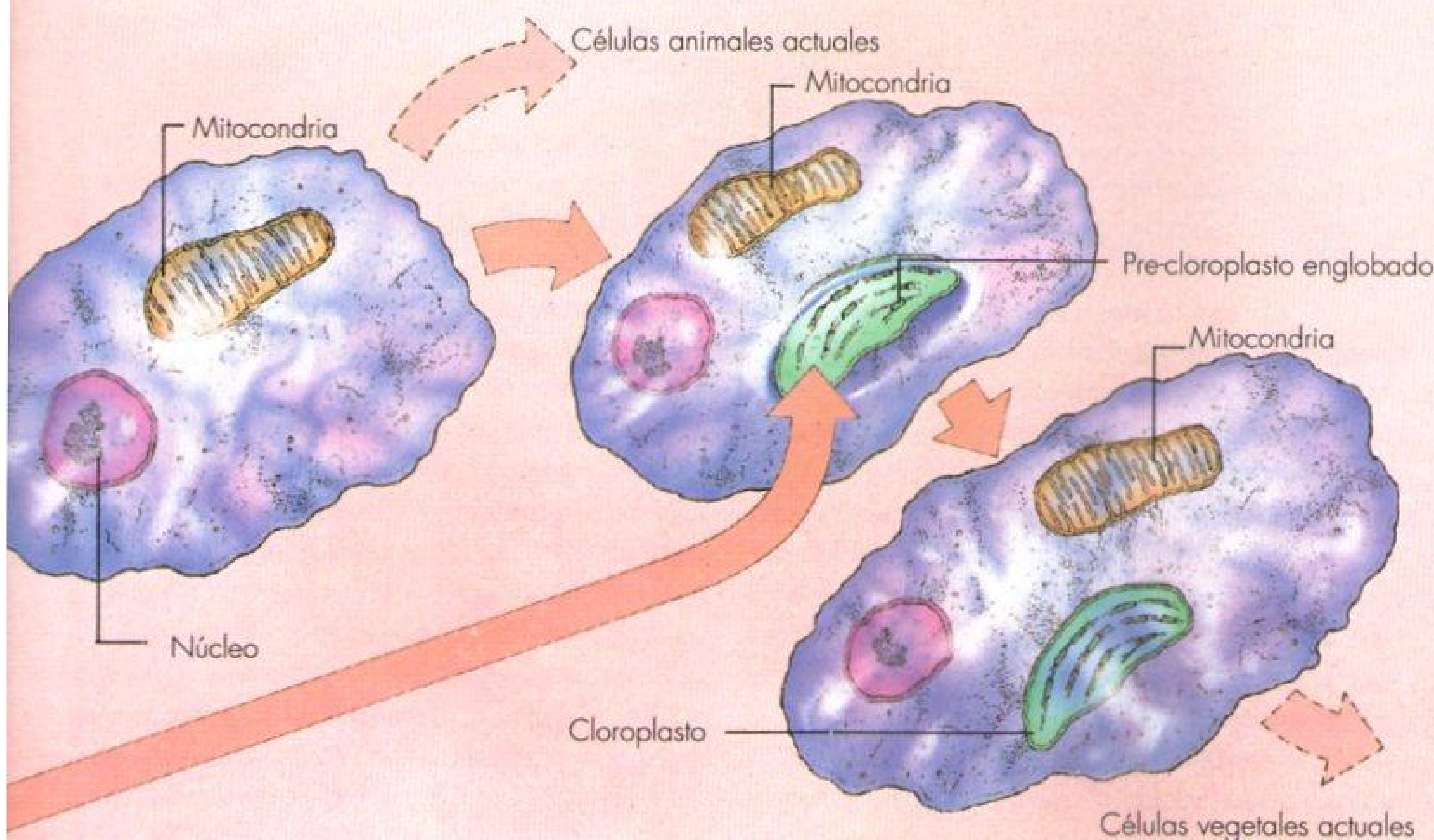
Esta explicación presupone la existencia de una antigua célula procariótica con un metabolismo básicamente anaerobio. Dicha célula evolucionó de tal modo que su organización genética fue cambiando hasta dotarla de un núcleo con múltiples cromosomas que contienen ADN (pp. 60-61). A continuación, la célula incorporó en su interior otras células procarióticas de diferente tipo, capaces de responder a la presencia de mayores niveles de oxígeno, ya que habían desarrollado un proceso de respiración que utilizaba precisamente oxígeno. En el aspecto bioquímico, esta respiración se basaba en nuevas enzimas y moléculas con hierro llamadas citocromos.

Con el tiempo, estas células incorporadas se transformaron en mitocondrias, orgánulos que poseían la misma capacidad para la respiración aerobia que la célula libre de la que

La precursora de las células eucarióticas debió ser una célula capaz de englobar otras y que tuviera sus propios genes empaquetados en un núcleo. En ella irían penetrando células de otros tipos. Ciertas bacterias aerobias que antes llevaban vida libre pudieron transformarse de este modo en mitocondrias, y otras células similares a las algas verdeazuladas se transformaron en cloroplastos. En ambos casos, los orgánulos así creados pasaron a depender del núcleo de la célula huésped para el control de algunos de sus procesos metabólicos, pero los cloroplastos y las mitocondrias conservan su propio ADN, que codifica varias de sus proteínas internas. Este ADN debe ser una reliquia de tiempos precámbricos, cuando los antepasados de las mitocondrias y los cloroplastos eran células de vida libre.



Este fósil de un invertebrado marino que vivió en el Precámbrico, hace unos 600 millones de años, se encontró en los montes Ediacara de Australia, y es uno de los fósiles de animales pluricelulares más antiguos que se conocen. Algunos expertos creen que se trataba de un celentéreo parecido a una medusa, mientras que otros opinan que pertenecía a un grupo diferente de invertebrados de cuerpo sencillo, que se extinguió antes del Cámbrico.



Las células de casi todos los animales actuales tienen mitocondrias, pero no cloroplastos; en cambio, las de las plantas tienen ambos tipos de orgánulos. La secuencia de cambios evolutivos que presentamos aquí sugiere que las células animales evolucionaron antes que las vegetales, pero podría haber sido al contrario: las células animales podrían haber evolucionado a partir de células vegetales que perdieron sus cloroplastos.

procedían, pero que ahora funcionaban en beneficio exclusivo de la célula compuesta. De manera similar, las algas verde-azuladas y otras células fotosintéticas debieron incorporar también células simbióticas que acabaron transformándose en cloroplastos.

Esta explicación del cambio evolutivo no deja de despertar dudas. Si las células precursoras de las mitocondrias pudieron desarrollar la respiración aerobia, ¿por qué no pudo hacer lo mismo la célula huésped? Tal vez se trate de saltos evolutivos tan difíciles que sólo ocurrieron una o dos veces en estirpes celulares muy concretas. En tal caso, la adquisición de estas nuevas células, tan escasas pero eficientes, reportaría grandes ventajas a la célula huésped. Ninguna otra hipótesis explica tan bien el hecho de que las mitocondrias y los cloroplastos posean ribosomas y ADN propios, una posible reliquia de su pasado como células independientes.

En algún período de finales del Precámbrico se desarrollaron células animales no fotosintéticas, tal vez a partir de células fotosintéticas que habían perdido sus cloroplastos. Las células eucarióticas animales obtienen nutrientes consumiendo materiales de otras células, en lugar de producirlos ellas mismas por medio de la fotosíntesis. Los primeros eucariontes unicelulares, que tal vez se parecieran a los protozoos actuales, debían alimentarse englobando células vegetales.

En un período posterior del Precámbrico aparecieron los animales pluricelulares o metazoos. Casi con seguridad, las primeras formas tenían el cuerpo blando, como los actuales gusanos platelmintos, y por eso no se han encontrado fósiles. Sin embargo, existen algunas evidencias indirectas de la existencia de metazoos hace entre 700 y 1.000 millones de años, en forma de galerías y excrementos fosilizados.

Los primeros fósiles directos de metazoos corresponden a las últimas etapas del Precámbrico, hace de 680 a 570 millones de años, y los principales ejemplos son los fósiles del Ediacario, descubiertos en los montes Ediacara del sur de Australia. Existen dos escuelas de pensamiento científico con respecto a estos organismos que vivieron en el mar y en el fondo marino hace 680 millones de años. La primera sostiene que se trata de representantes de grupos que existen en la actualidad, y que las formas de sus cuerpos presentan semejanzas con las de algunos invertebrados actuales, como los escifozoos, los pennatúlidos y los gusanos anélidos.

La segunda escuela sostiene que las semejanzas son casuales, y que los animales del Ediacario fueron los primeros experimentos evolutivos en el terreno de las formas animales pluricelulares, y que ninguno de ellos tuvo continuidad en el período Cámbrico.

Sea cual sea la verdad, los animales del Ediacario ocupan una posición especial en la larga lista de animales que han vivido en nuestro planeta. Son los primeros representantes conocidos de la vida animal diferenciada.



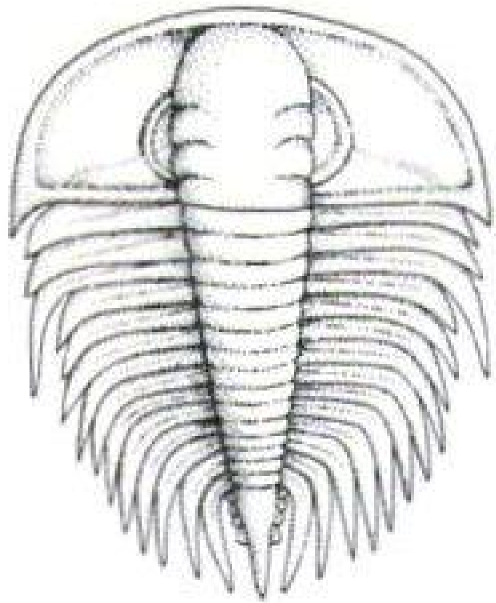
LA EXPLOSIÓN CÁMBRICA

La vida cobró empuje durante el período Cámbrico. Al final del mismo, habían aparecido todos los principales tipos de animales cuyos descendientes pueblan el mundo actual. Toda esta diversidad floreció en el mar; la vida terrestre aún no existía.

Los paleontólogos han determinado que la transición entre el Precámbrico y el Cámbrico tuvo lugar hace unos 570 millones de años. Al examinar los estratos rocosos inmediatamente anteriores y posteriores a esta transición, da la impresión de que alguien hubiera apretado un botón que desencadenara la «diversidad animal».

Antes de la transición, había fósiles de fauna del Ediacario (el período terminal del Precámbrico) y unos pocos fósiles de carbonato cálcico en forma de tubo, como *Cloudina* y *Sinotubulites*. Todos ellos, excepto *Sinotubulites*, desaparecieron durante la transición, para ser sustituidos por una diversidad cada vez mayor de fósiles de animales pluricelulares, tanto de cuerpo blando como de cuerpo duro. Esta súbita expansión y aumento de complejidad de los animales pluricelulares ha recibido el nombre de «la explosión cámbrica», y constituye uno de los saltos más extraordinarios en el registro fósil.

A finales del Cámbrico, tan sólo 80 millones de años después, las consecuencias evolutivas de la explosión cámbrica habían establecido todos los principales tipos zoológicos que conocemos en la actualidad. Inmediatamente después de la transición Precámbrico/Cámbrico, se advierten en el registro fósil los primeros resultados de la explosión vital: numerosos tipos de moluscos primitivos, braquiópodos, los primeros equinodermos, toda una variedad de esponjas y algunas formas actualmente extinguidas, como los arquiciátidos (*Archaecyata*) y los trilobites.



Trilobites

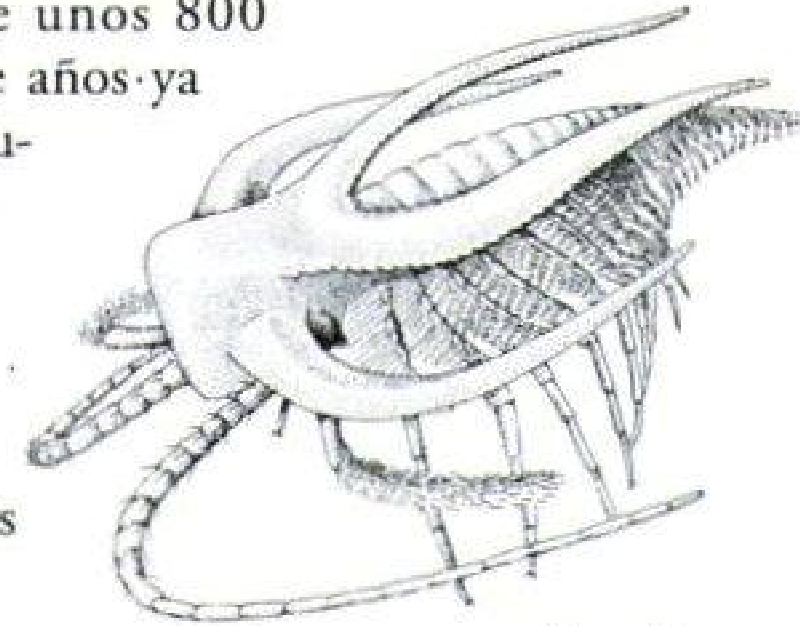
Los arquiciátidos eran extraños animales en forma de botella, de apenas un centímetro de altura, con dos paredes en el cuerpo y esqueletos porosos de carbonato cálcico. Se desconocen sus relaciones evolutivas. Los trilobites fueron unos de los primeros artrópodos (animales con patas o apéndices articulados). Estaban cubiertos por un exoesqueleto duro, que tenían que mudar varias veces a medida que crecían.



Arquiciátido

También existen fósiles de placas o espinas de animales de cuerpo blando, protegidos por estas formaciones como si se tratara de diminutos erizos. Otro tipo de espinas son las de los fósiles conodontos, que son como minúsculos dientecitos ganchudos, compuestos de carbonato cálcico. El hallazgo de fósiles similares en estratos muy posteriores ha permitido deducir que los animales a los que pertenecían los conodontos tenían forma de gusanos, y quizá se tratara de primitivos cordados, el grupo del que derivaron todos los vertebrados, incluyendo la especie humana.

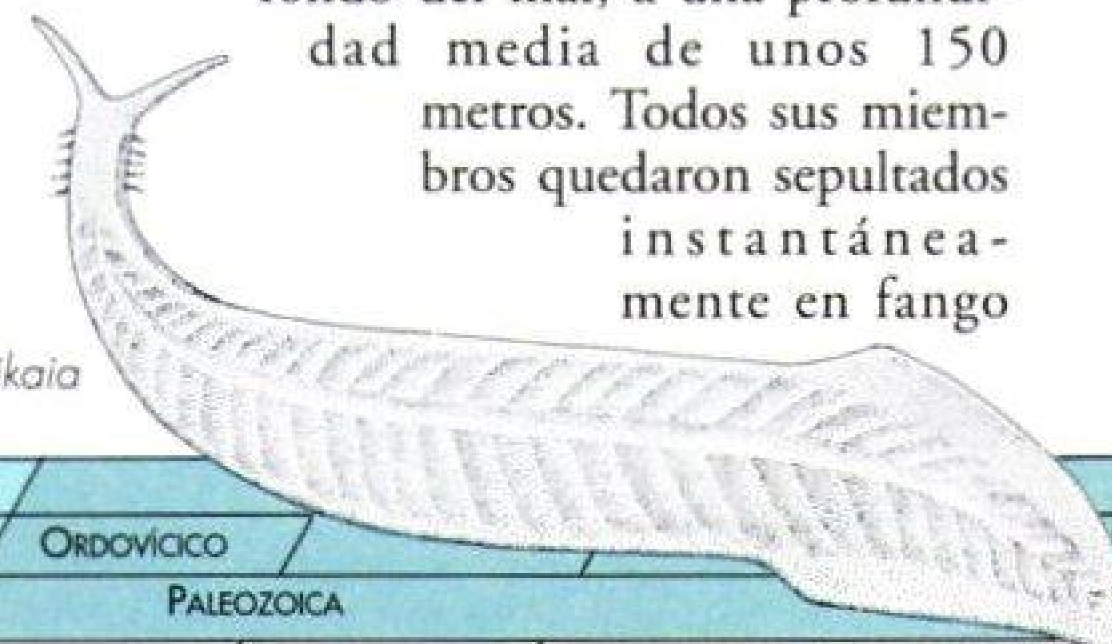
Estos primitivos animales del Cámbrico quedaron fosilizados porque poseían caparazones mineralizados. Algunos científicos opinan que la aparición, relativamente súbita, de caparazones duros se debió al continuo aumento del oxígeno atmosférico, a consecuencia de la fotosíntesis de las plantas verdes, que también estaban experimentando una considerable diversificación. Hace unos 800 millones de años ya habían evolucionado las algas pluricelulares, que se sumaron a sus parientes verde-azuladas en la producción de oxígeno. El aumento de la cantidad de oxígeno hizo posible la evolución de animales de mayor tamaño, y así surgió la necesidad de una protección adicional, resuelta mediante el desarrollo de conchas o exoesqueletos duros.



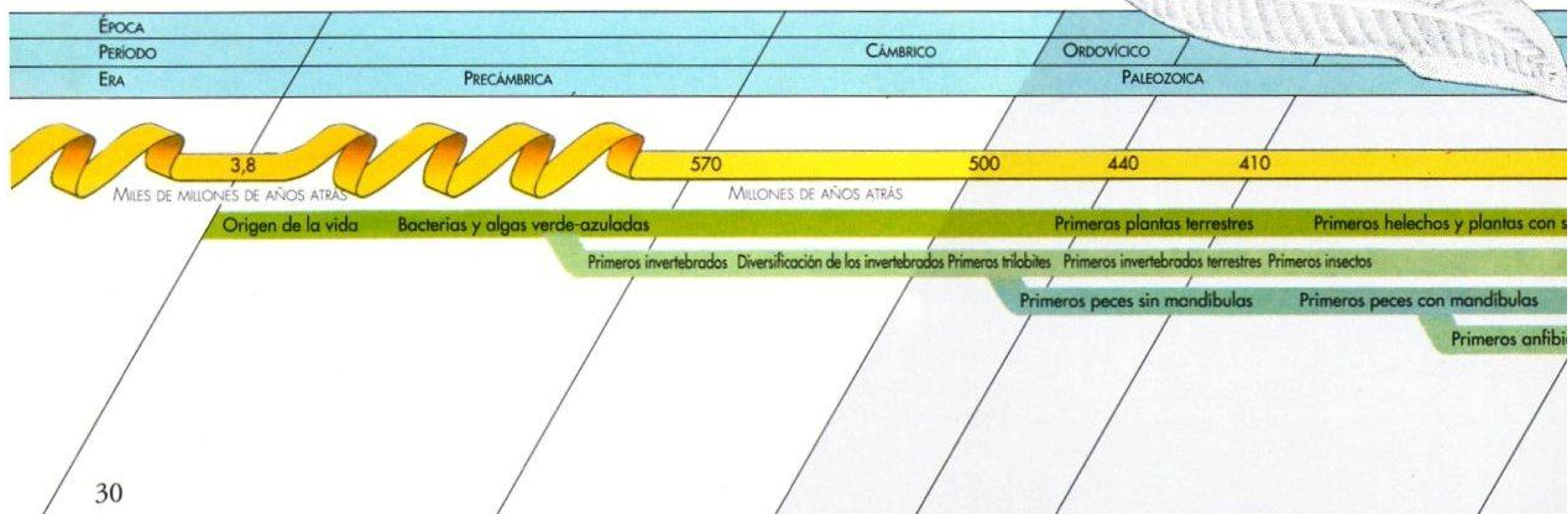
Marrella

Los fósiles de las pizarras de Burgess, en la Columbia Británica (Canadá), proceden del Cámbrico medio, hace unos 530 millones de años, y constituyen uno de los conjuntos fósiles mejor conservados de todos los tiempos. Las inmejorables condiciones de fosilización permitieron la conservación, no sólo de esqueletos mineralizados, sino incluso de partes blandas de los animales.

Parece que aquella comunidad zoológica vivía sobre los sedimentos del fondo del mar, a una profundidad media de unos 150 metros. Todos sus miembros quedaron sepultados instantáneamente en fango



Pikaia



anaerobio, debido a una avalancha de barro. La falta de oxígeno retardó la descomposición, permitiendo que se formaran fósiles en la pizarra de grano fino. El yacimiento fue descubierto en 1909 por el paleontólogo norteamericano Charles Walcott, y desde entonces se han extraído de él decenas de millares de fósiles.

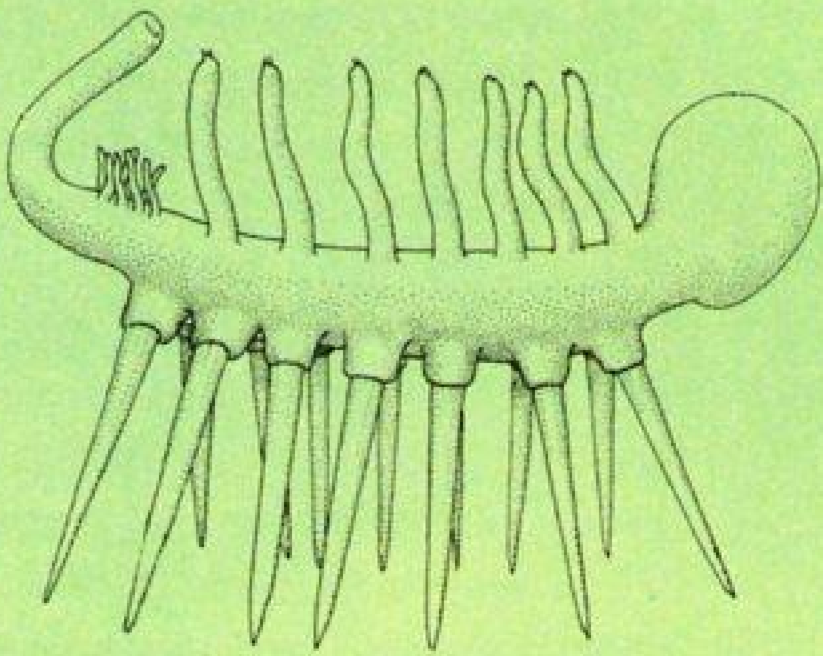
La fauna de las pizarras de Burgess incluía más de 100 géneros diferentes de animales, tanto de cuerpo duro como de cuerpo blando. Había trilobites acorazados y artrópodos con numerosas patas como el *Marrella*, muchos de los cuales resultan difíciles de clasificar en los modernos grupos de artrópodos.

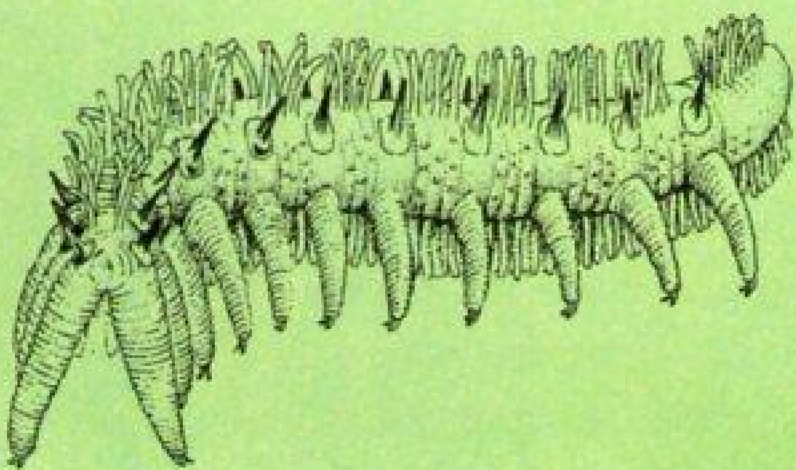
Abundaban las esponjas y los braquiópodos, así como primitivos equinodermos (crinoideos) y una amplia gama de moluscos. Incluso se ha encontrado lo que parece un primitivo cordado, el *Pikaia*. Los gusanos se arrastraban sobre la superficie del fango o excavaban túneles en él. El *Canadia*, un anélido poliqueto, es un ejemplo de los habitantes de la superficie del fango; la mayoría de los excavadores, como el *Ottoia*, parecen haber pertenecido al ahora escaso grupo de los priapuloideos.

Algunos de los fósiles más interesantes de las pizarras de Burgess no se pueden incluir con seguridad en ninguno de los grupos zoológicos actuales. Steven Jay Gould, autor del libro *Wonderful Life*, acerca de los fósiles de las pizarras de Burgess, considera esto como una prueba de que aquellos organismos fueron los primeros experimentos evolutivos en el terreno de las formas animales, y sólo algunas de estas formas sobrevivieron al Cámbrico. Lo cierto es que después del Cámbrico han aparecido muy pocos diseños corporales verdaderamente nuevos.

¿CUÁL ES LA POSICIÓN CORRECTA?

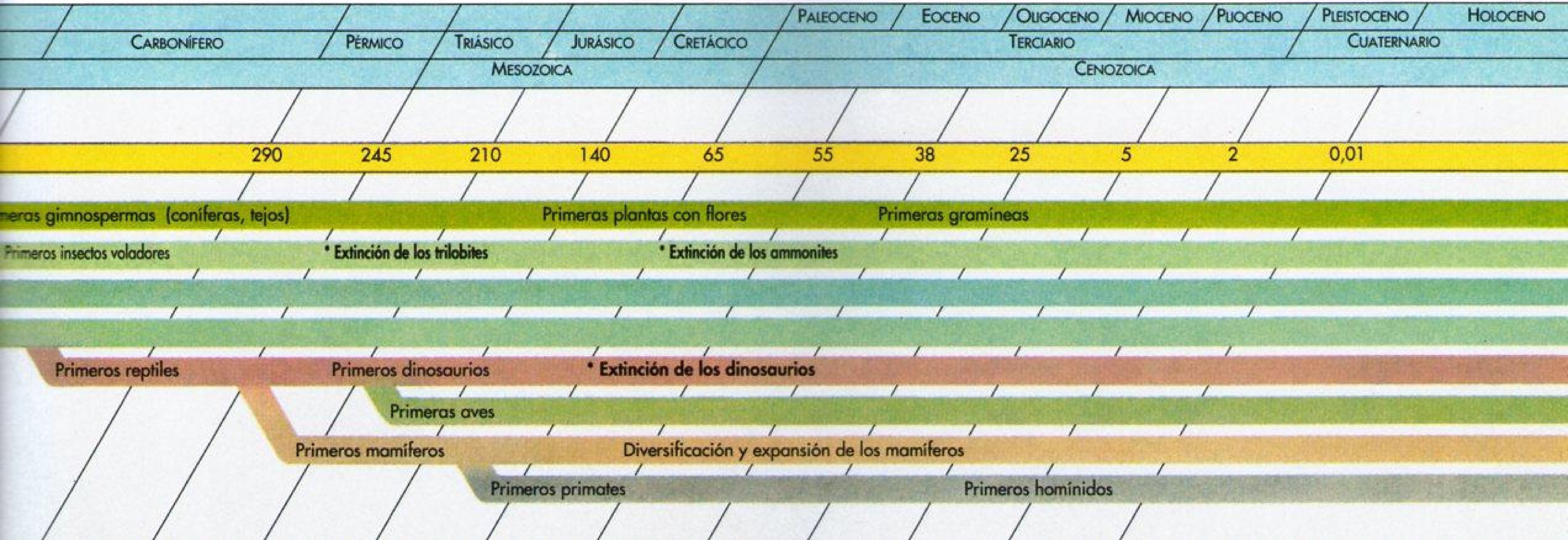
Uno de los animales encontrados en las pizarras de Burgess constituye un buen ejemplo de los riesgos que se corren al interpretar fósiles. El *Hallucigenia* se describió por primera vez en 1977, y recibió su nombre a causa de «su extraña y onírica apariencia». Parecía tratarse de un típico experimento de la naturaleza, de corta duración. Presentaba una hilera de tentáculos a lo largo del dorso, rematados por pequeñas uñas, y una doble hilera de siete pares de espinas, que parecían servir para andar. Su extraña morfología no daba facilidades para deducir su modo de vida. Los recientes estudios de fósiles cámbricos de China y un nuevo examen de las especies de Burgess ya conocidas han demostrado que todas aquellas primeras hipótesis acerca del *Hallucigenia* eran completamente erróneas. En lugar de tratarse de un callejón sin salida evolutivo, parece que fue el antepasado directo de un grupo que todavía sigue existiendo. Perteneció al grupo de los lobópodos acorazados, y parece haber sido el antecesor de los actuales onicóforos, que parecen un cruce entre una lombriz y un ciempiés. Los «tentáculos» eran, en realidad, patas, similares a las patas tubulares de los onicóforos actuales. Las espinas estaban en el dorso y posiblemente servían como protección contra los depredadores. El fósil se había reconstruido en posición invertida.


Hallucigenia


Lobópodo acorazado

Animales como el *Wixwaxia*, el *Odontogriphus*, el *Opabinia*, y el «enorme» *Anomalocaris* (un depredador nadador de 45 cm de longitud) presentan una sorprendente mezcla de características que parece corroborar la hipótesis de Gould. Al contemplar esta fantástica galería de extrañas criaturas, no resulta difícil creer que en aquellos tiempos se estaban barajando y repartiendo una y otra vez las cartas del diseño animal, y que pocas de aquellas bazas resultaron útiles a largo plazo.

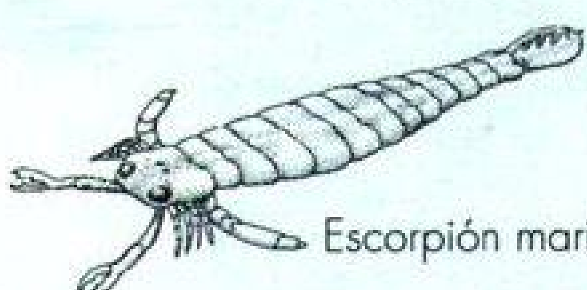
La escala temporal de estas páginas y las siguientes muestra el orden cronológico más probable de los principales acontecimientos en la evolución de la vida en la Tierra. Las principales unidades de tiempo geológico son las eras, que comienzan con el Precámbrico. Cada era está dividida en períodos; y el período Cenozoico, además, está subdividido en épocas. Las fechas de la tabla indican el comienzo de cada período o época. Las ramificaciones del árbol evolutivo se ajustan a los conocimientos actuales, pero los nuevos descubrimientos fósiles obligan a un constante reajuste.





POBLANDO LOS MARES

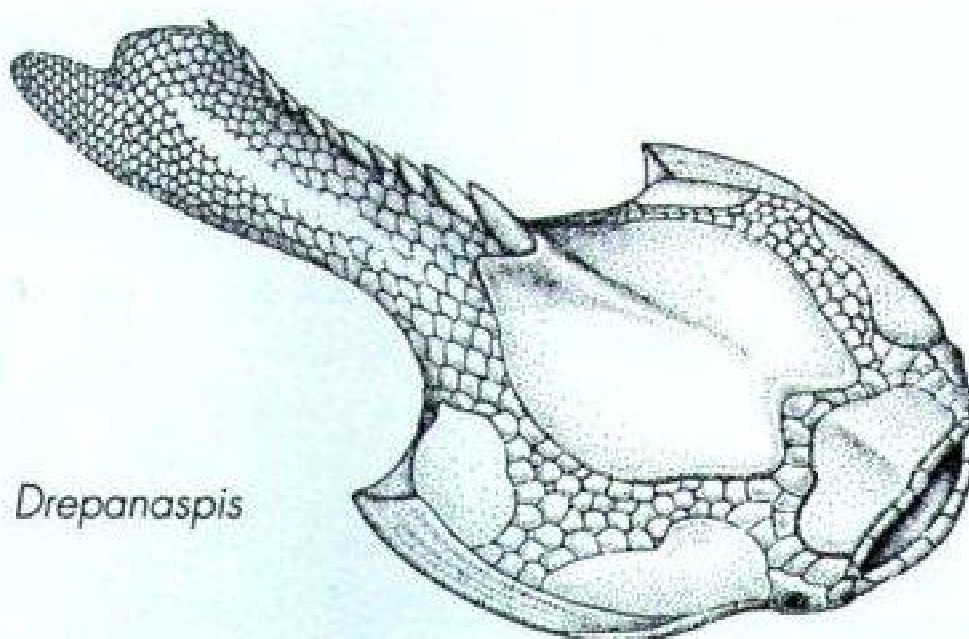
Hace 500 millones de años, todos los animales y plantas que existían eran aún marinos. Durante los 140 millones de años siguientes, la vida marina continuó diversificándose, y aparecieron grupos como los corales, los erizos de mar y los moluscos bivalvos. Los peces —los primeros animales vertebrados— comenzaron a dominar los mares. Las glaciaciones y los grandes movimientos tectónicos de los continentes afectaron a los ecosistemas marinos durante todo este tiempo, que se ha dividido en tres períodos, definidos por sus fósiles característicos. Por orden cronológico, estos períodos son el Ordovícico, el Silúrico y el Devónico.

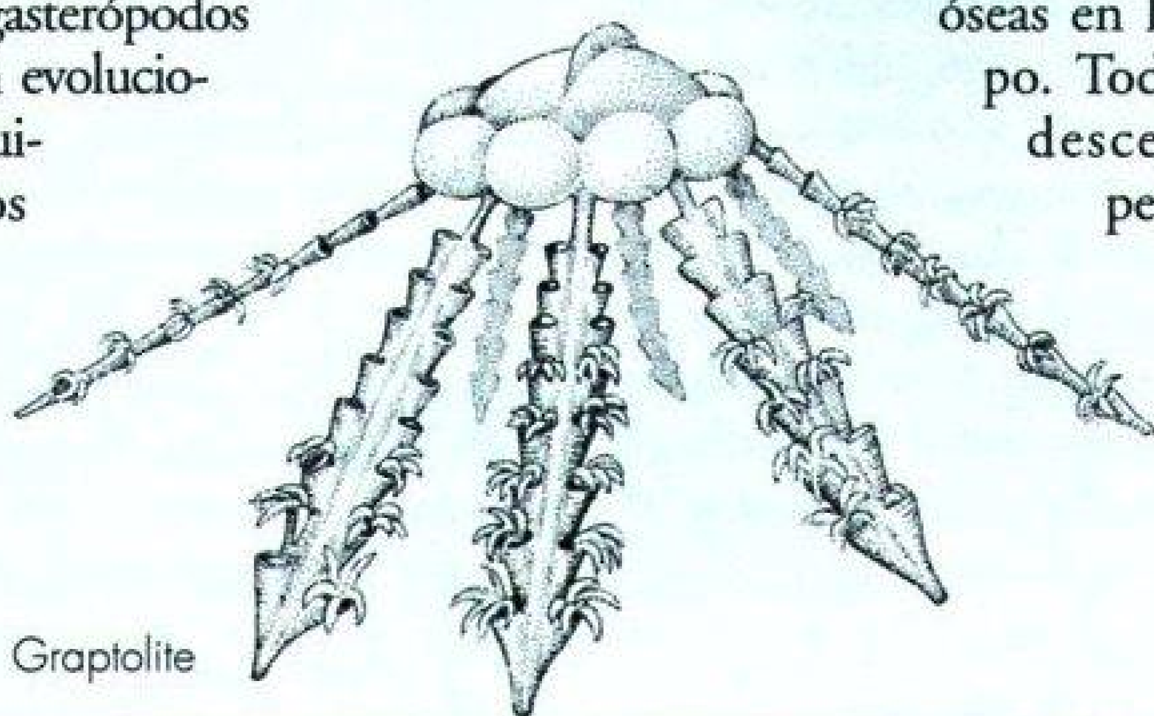

Escorpión marino

Tres grupos de invertebrados aparecidos en el Cámbrico se hicieron especialmente abundantes y variados: los trilobites, los braquiópodos y los graptolites. Estos últimos, abundantísimos en los yacimientos del Ordovícico, eran animales muy pequeños que formaban colonias ramificadas y probablemente estaban emparentados con una de las ramas primitivas del tronco de los cordados: los hemicordados.

También los moluscos estaban haciéndose más complejos: los sencillos monoplacóforos con forma de lapa empezaron a diversificarse, dando lugar a los bivalvos (como los mejillones) y a los gasterópodos (caracoles). También evolucionaron los corales, equinodermos como los crinoideos y los erizos de mar, y los briozoos coloniales.

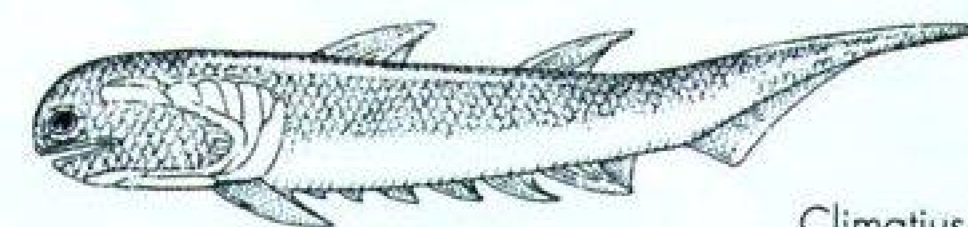
Los primeros peces con vértebras debieron aparecer en el Cámbrico, ya que se han encontrado escamas fósiles correspondientes al final de este período. Pero los primeros fósiles completos de peces pertenecen al Ordovícico, como el género *Arandapsis*, de Australia. Este pez no tenía mandíbulas ni dientes, sino tan sólo una boca redonda, a manera de ventosa; sin embargo, tenía branquias para respirar en el agua. A finales de este período existían ya muchos otros tipos de peces primitivos sin mandíbulas, y durante el período Silúrico empezaron a conquistar las aguas dulces. Eran animales pesados y lentos, que escarbaban en el fondo en busca de algas y otras partículas alimenticias, aunque también capturaban animales comedores de plancton, tan lentos como ellos. Muchos de aquellos peces, como el *Drepanaspis* y el *Pteraspis*, tenían una coraza de placas óseas en la cabeza y el cuerpo. Todavía viven algunos descendientes de los peces sin mandíbulas, como la lamprea y el mixino.


Drepanaspis


Graptolite

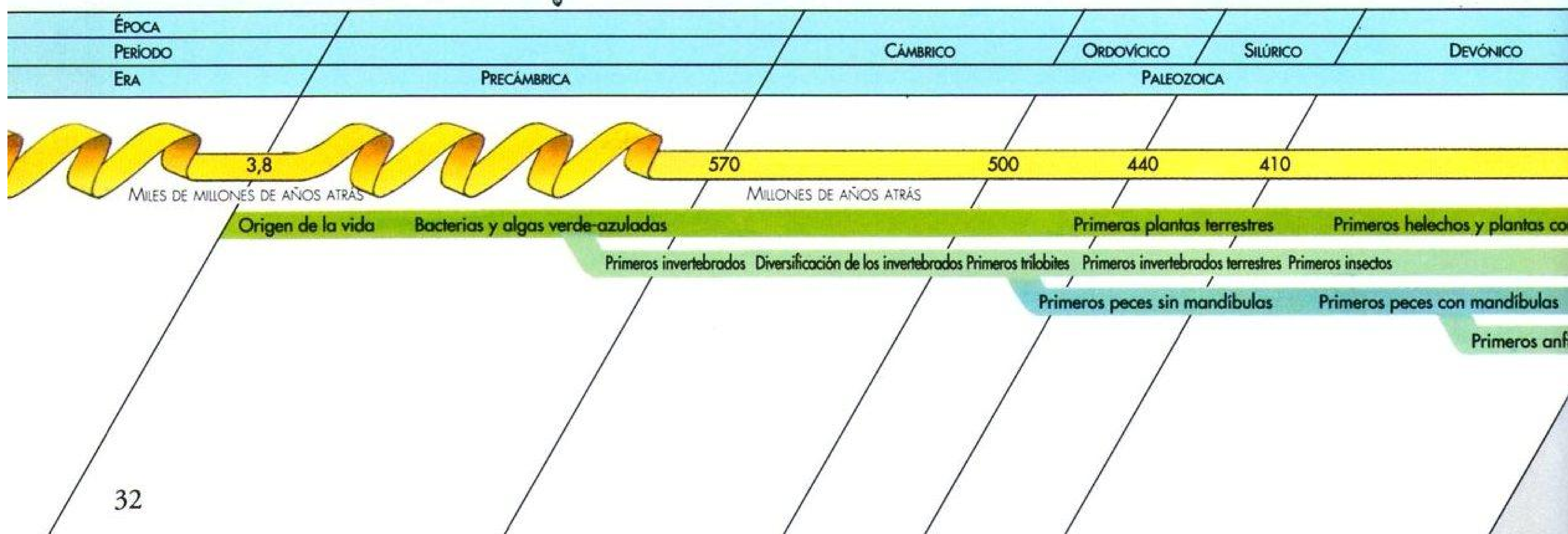
Los primeros peces con mandíbulas y dientes evolucionaron a principios del Silúrico, unos 80 millones de años después que sus antecesores sin mandíbulas. El desarrollo de las mandíbulas desencadenó un torrente de variación evolutiva. Con la capacidad de manipulación que les conferían las mandíbulas y los dientes, los peces pudieron convertirse en depredadores activos, capaces de atrapar a sus presas no sólo en el fondo sino también en medio del agua.

Al igual que sus parientes sin mandíbulas, los primeros peces mandibulados, como el *Climatius*, tenían esqueletos cartilaginosos, no óseos. Aunque poco después aparecieron peces con esqueleto óseo, las formas cartilaginosas no desaparecieron, sino que dieron lugar al grupo de los condrictios, cuyos representantes actuales son los tiburones, las rayas y las quimeras.


Climatius

A pesar de todo, los peces óseos se fueron diversificando cada vez más durante el Silúrico tardío y el Devónico, período al que se identifica como «la era de los peces». Por fin, se diferenciaron en dos grupos: los peces de aletas con radios (actinopterigios), de los que descienden los principales grupos de peces óseos modernos; y los peces de aletas carnosas (sarcopterigios), cuyas aletas pares tenían bases musculares.


Nautiloideo



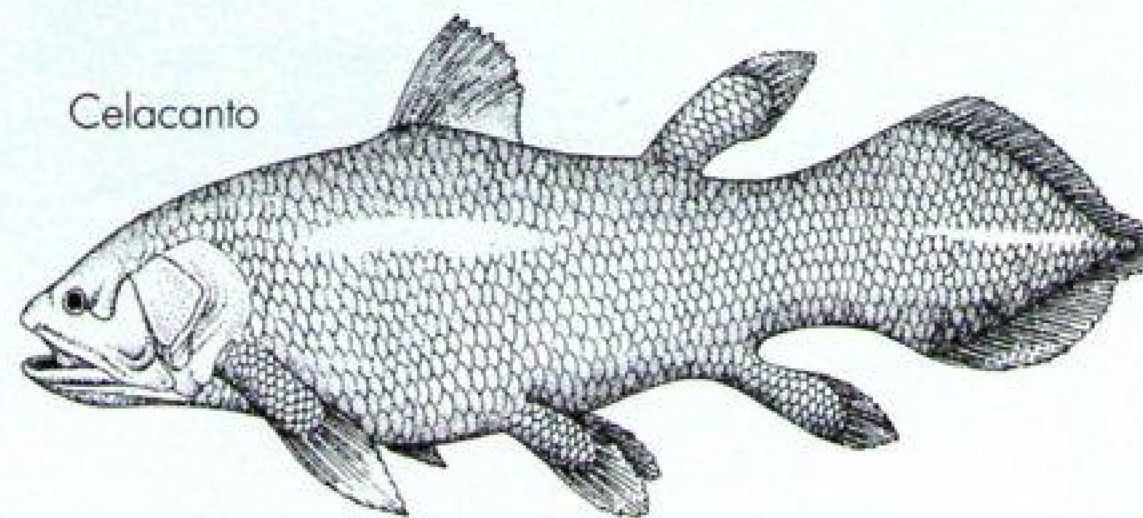
Entre estos últimos figuraban los celacantos y los peces pulmonados, que han sobrevivido hasta nuestros días, y también los ripidistios, un grupo de peces que tuvo una importancia evolutiva trascendental, ya que algunos de ellos fueron los antepasados más probables de los vertebrados terrestres.

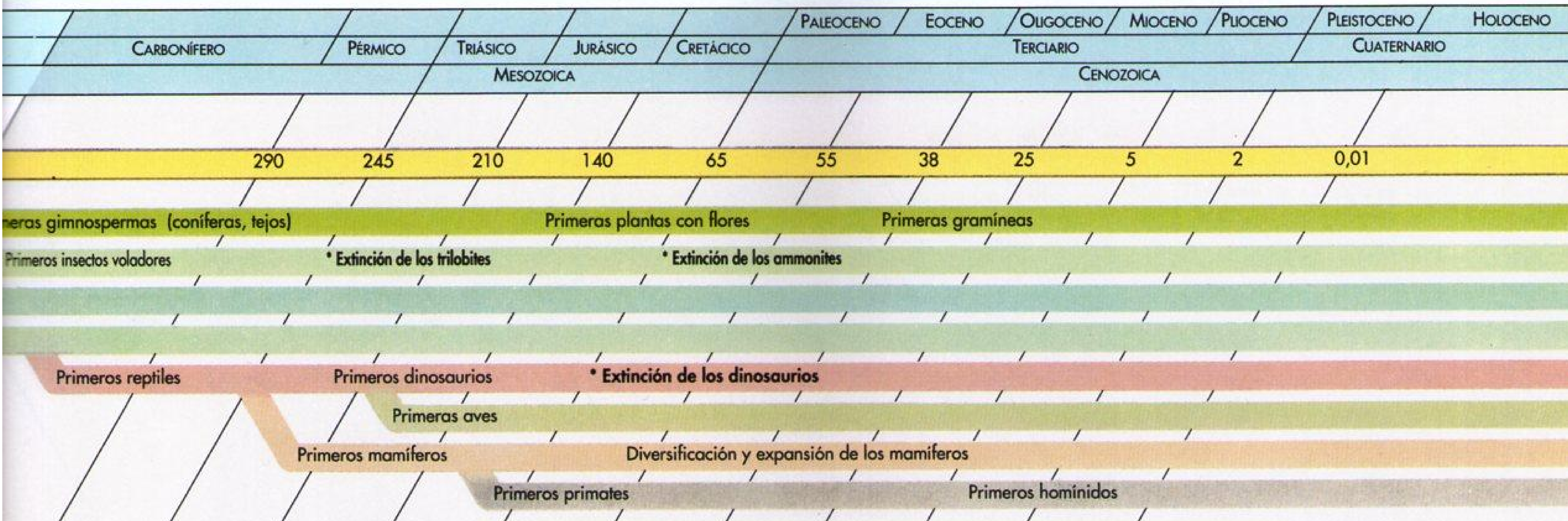
Durante el Silúrico y el Devónico continuaron produciéndose importantes cambios evolutivos en el mundo de los invertebrados: los moluscos cefalópodos se diversificaron con rapidez, comenzando por los nautiloideos, que primero eran rectos y después enroscados en espiral. Seguramente tenían la concha dividida en cámaras, como la del moderno *Nautilus*. Los ammonites evolucionaron a partir de los nautiloideos a principios del Devónico, y tenían una estructura similar. Ambos grupos eran eficaces depredadores, que utilizaban sus tentáculos para capturar otros invertebrados y peces pequeños, tanto en el fondo como en medio del agua.

Los enormes escorpiones de mar, un grupo de artrópodos ya extinguido, podían llegar a medir más de dos metros de longitud y eran depredadores aún más feroces, capaces de capturar cualquier pez, con excepción de los más grandes. Seguramente, la fuerte coraza que poseían muchos peces primitivos les servía como protección contra las pinzas de estos carnívoros.

A finales del Silúrico habían aparecido ya algunas plantas terrestres sencillas. Cuando los ecosistemas vegetales quedaron establecidos, fueron colonizados por los primeros animales terrestres, probablemente escorpiones y miriápodos. En el Devónico, la vida vegetal fue ganando complejidad, y se formaron los primeros bosques de helechos arborescentes y equisetos. Y en estos primeros bosques aparecieron los primeros vertebrados terrestres: los anfibios.

Un terrible depredador: el *Dunkleosteus* era un pez de finales del Devónico, que podía llegar a medir 3 metros y medio. Mediante movimientos sinuosos de su poderoso cuerpo y su cola de anguila, este enorme animal recorría los mares en busca de peces que devorar.







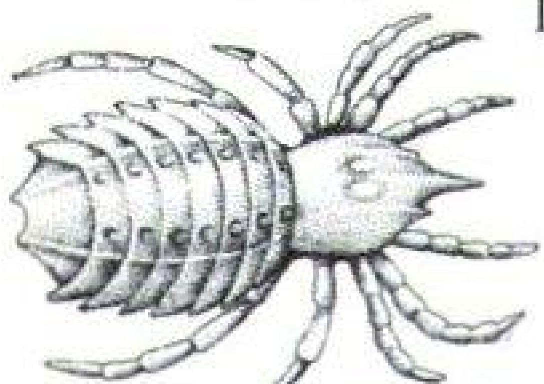
LA CONQUISTA DE LA TIERRA

El momento en que la vida animal comenzó a colonizar la tierra firme constituye uno de los grandes hitos de la evolución. Desde los comienzos de la vida celular en la Tierra, hace unos 4.000 millones de años, los organismos habían vivido exclusivamente en el mar. Pero en el período Silúrico, hace unos 400 millones de años, existían ya algunos organismos de agua dulce. Aproximadamente en la misma época, las plantas empezaron a colonizar las orillas enfangadas de las marismas litorales y se fueron volviendo mucho más complicadas que las sencillas algas marinas. Estas nuevas formas vegetales se caracterizaban por poseer sistemas internos de tubos o vasos (por eso se las llama plantas vasculares). Lo mismo que en las plantas modernas, dichos vasos transportaban agua y nutrientes del suelo a todas las partes de la planta y distribuían los productos de la fotosíntesis.

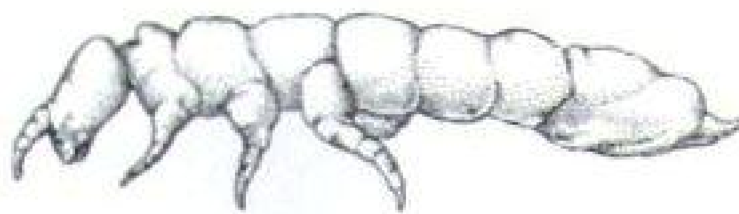


Libélula

Con este sistema de transporte, los vegetales adquirieron la posibilidad de desarrollar una anatomía más compleja, con partes especializadas en diferentes funciones: hojas para la fotosíntesis, tallos para sostener la planta y raíces para anclarla al suelo y absorber agua y minerales. Este fue otro hito evolutivo, una «novedad de diseño» que permitió a las plantas acceder a los hábitats terrestres. En el Devónico existían ya equisetos gigantes y helechos arborescentes que formaban grandes comunidades terrestres, aunque siempre en zonas pantanosas húmedas.



Arácnido parecido a una araña

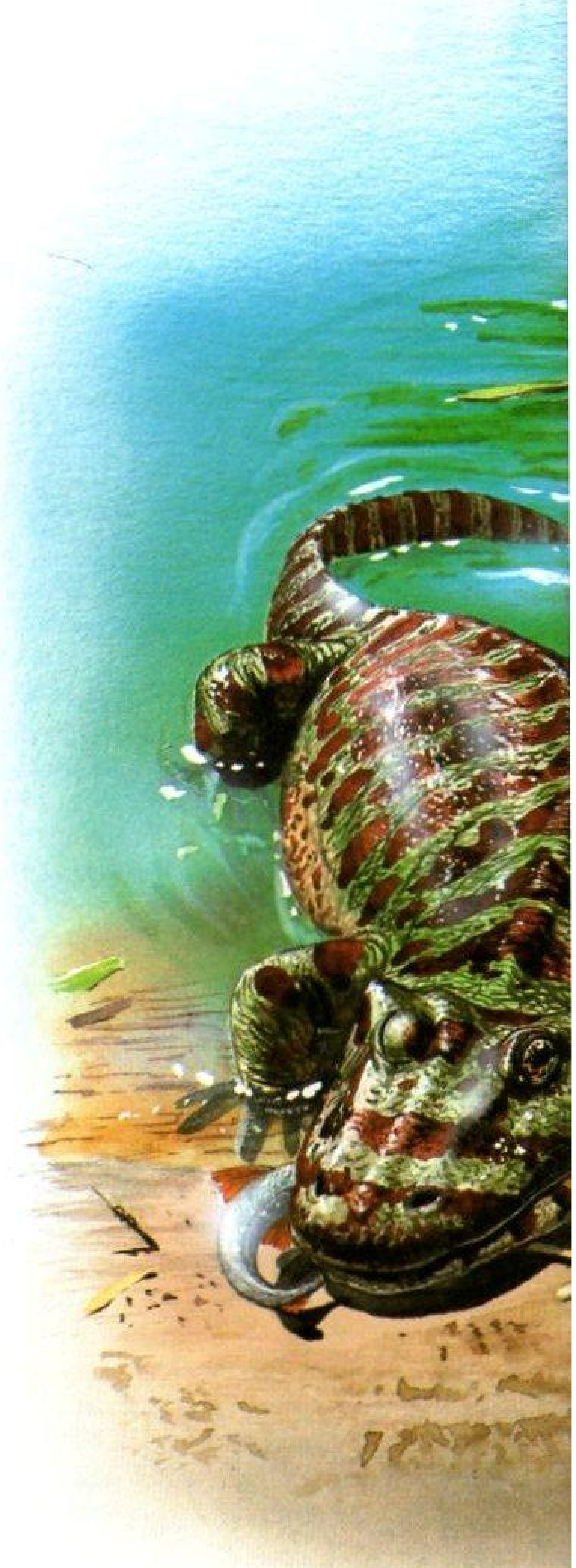


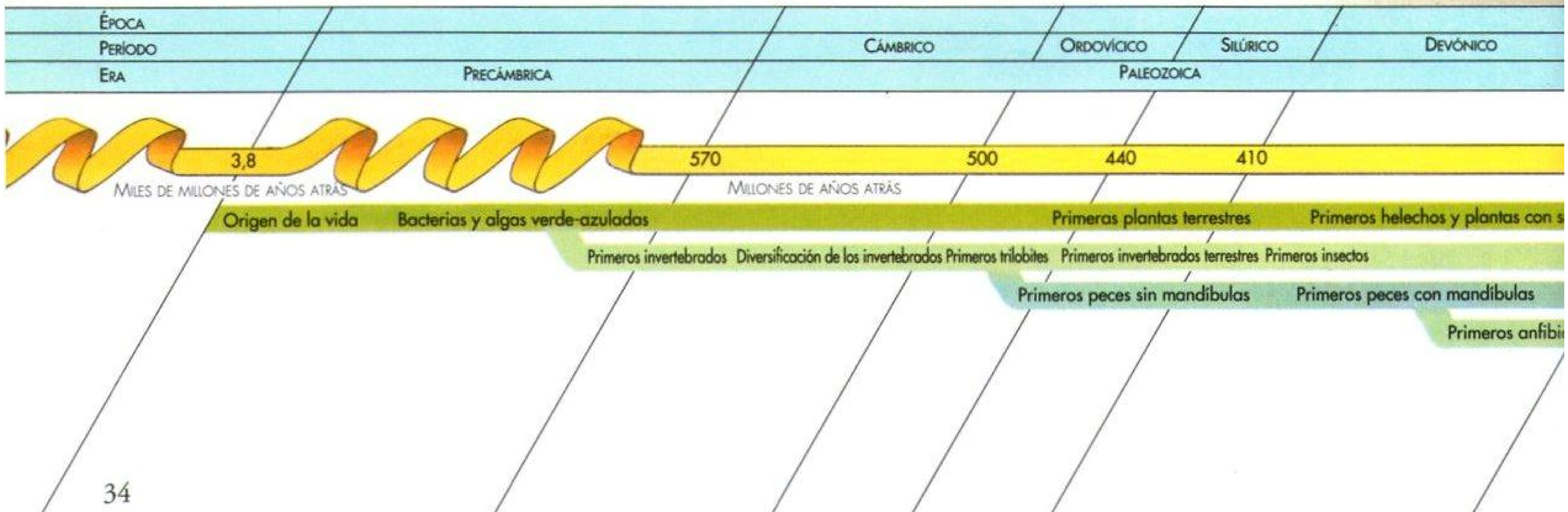
Colémbolo

En cuanto las plantas fotosintéticas consiguieron establecerse en tierra, quedó abierta la puerta a organismos más complejos, todos los cuales dependían de la productividad de las plantas. Dicho con otras palabras: ya había comida en tierra firme. Los primeros animales que desarrollaron especializaciones que les permitieron ocupar nichos en este nuevo mundo parece que fueron los artrópodos. Se han encontrado sus restos fosilizados junto a los de las primitivas plantas del pantano. Aquellos primeros insectos sin alas —colémbolos y tisanuros— se alimentaban probablemente de restos vegetales, células de algas y hongos que descomponían las plantas muertas. Posteriormente evolucionaron depredadores —posiblemente, arácnidos semejantes a las actuales arañas— que se alimentaban de los herbívoros. Casi con seguridad, en los pan-



Pez ripidistio





tanos vivían también gusanos y otros invertebrados de cuerpo blando, pero sus cuerpos no han fosilizado.

Durante el Devónico tardío y todo el Carbonífero, algunas plantas terrestres, como los licopodios, se fueron diversificando cada vez más y empezaron a crecer en terrenos más secos, y no sólo en los pantanos. Al mismo tiempo, en los diferentes sistemas de vegetación aparecieron nuevos tipos de invertebrados, entre ellos escorpiones, miriápodos y algunos insectos como las cucarachas y las libélulas, que probablemente vivían de manera muy similar a la de sus actuales descendientes.

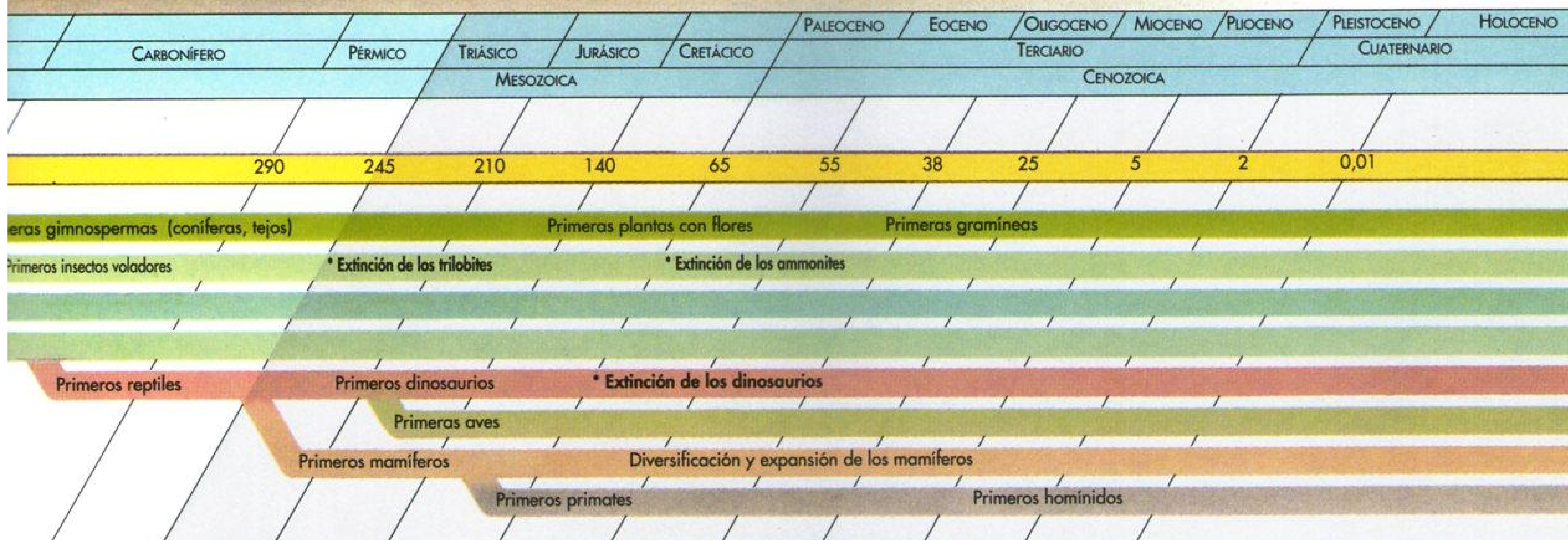
Los primeros animales vertebrados empezaron a invadir la tierra firme durante la transición del Devónico al Carbonífero, hace unos 370 millones de años. En yacimientos de finales del Devónico, correspondientes a bosques pantanosos cálidos que crecieron en tierras de Groenlandia actualmente cubiertas por glaciares, se han encontrado fósiles de anfibios, los primeros vertebrados terrestres.

Se cree que los anfibios descendieron de los ripidistios, un grupo de peces sarcopterigios de aletas carnosas. Aquellos peces eran carnívoros y podían vivir en agua salada o dulce, tenían aletas pares muy musculosas y poseían pulmones u órganos muy similares. Hace unos 350 millones de años, estos peces se habían transformado en animales de respiración aérea, con cuatro extremidades que les permitían caminar por tierra firme. Al igual que los anfibios actuales, ponían los huevos en el agua y sus larvas eran completamente acuáticas.

A partir de estos primeros anfibios, como el *Ichthyostega*, que todavía tenía cola y escamas de pez, evolucionaron varios tipos diferentes. Algunos se parecían a los actuales cocodrilos en tamaño y forma. El grupo que tuvo más éxito fue el de los laberintodontos, que incluía formas tan pequeñas como los actuales tritones y otras tan grandes como el *Eogrynus*, que llegaba a medir 4,5 metros.

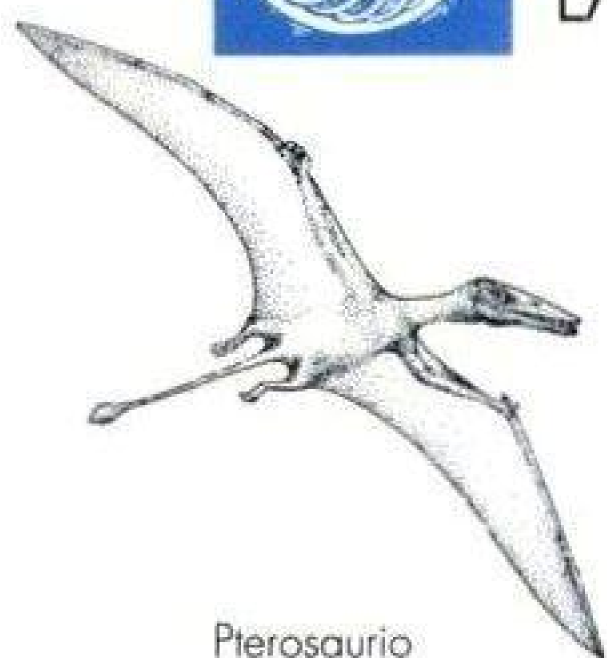
Durante toda la segunda mitad del Carbonífero y la primera mitad del Pérmico, la tierra estuvo dominada por una variada gama de anfibios carnívoros. Las formas más acuáticas se alimentaban de peces, y las más terrestres de insectos, otros invertebrados y anfibios más pequeños. También es posible que cazaran a los primeros reptiles, que habían evolucionado a partir de uno de los grupos de anfibios hace unos 300 millones de años, durante el Carbonífero.

Los primeros vertebrados que vivieron en tierra firme fueron anfibios de gran tamaño, como el *Eryops*, que podía medir hasta 2 metros. Su cuerpo macizo estaba recubierto por fuertes placas óseas, que le ayudaban a sostenerse en tierra.





LA ERA DE LOS DINOSAURIOS



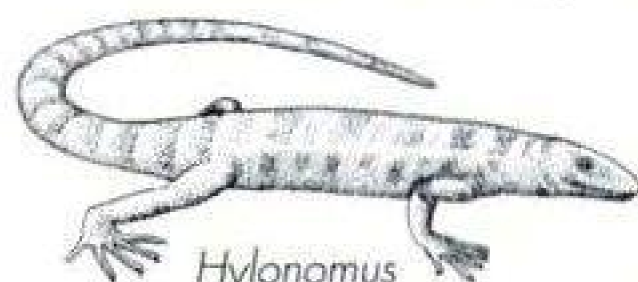
Pterosaurio

Los reptiles fueron los primeros vertebrados verdaderamente terrestres, y dominaron la vida en tierra firme durante los períodos Triásico, Jurásico y Cretácico, entre 245 y 65 millones de años atrás. Existían muchos tipos de reptiles, pero ninguno tuvo tanto éxito como los dinosaurios, que alcanzaron una cumbre de diversidad evolutiva.

Los anfibios, a partir de los cuales evolucionaron los reptiles, nunca fueron terrestres más que a medias. Su sistema de reproducción los hacía seguir dependiendo del agua, ya que tanto los huevos como las formas juveniles («renacuajos») eran completamente acuáticos. La gran baza evolutiva de los reptiles fue el desarrollo del huevo con cáscara, que no se secaba al quedar al aire. Gracias a este tipo de huevos, algunos reptiles pudieron cortar el «cordón umbilical» ecológico que mantenía a los anfibios atados al agua y vivir toda su vida en tierra.

Los primeros reptiles que dieron este paso evolucionaron a finales del Carbonífero, hace unos 300 millones de años. Un ejemplo típico es el *Hylonomus*, un pequeño reptil de unos 20 cm de longitud que se alimentaba de insectos en los bosques de licopodios gigantes de la época.

Durante los períodos Pérmico y Triásico, los descendientes de los primitivos reptiles colonizaron todo tipo de terrenos, incluidos los desiertos. Sus huevos resistentes a la sequedad, su piel escamosa que reducía la evaporación y su sistema de fecundación interna les permitieron prosperar en hábitats áridos, donde no habría podido sobrevivir ningún vertebrado anterior. Algunos de los reptiles que evolucionaron en aquellos tiempos todavía existen, como es el caso de las tortugas. Y mientras los reptiles terrestres comenzaban a conquistar la Tierra, evolucionaron también formas marinas grandes y aerodinámicas, como los plesiosaurios y los ictiosaurios.

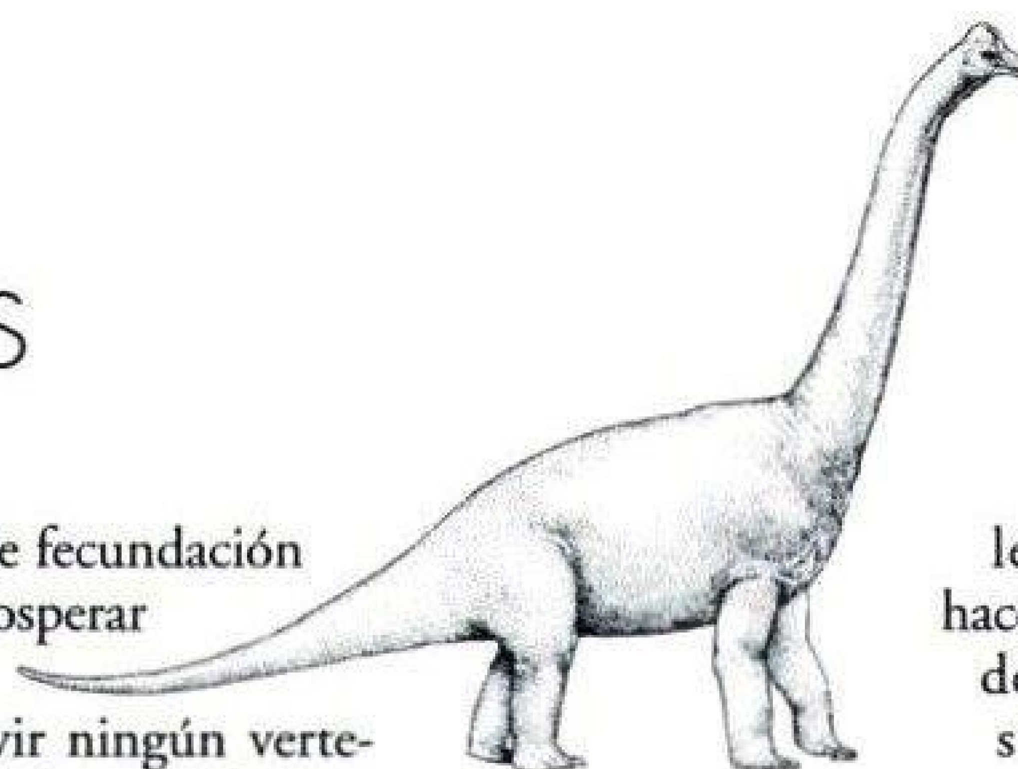


Hylonomus

Los dinosaurios y sus parientes cercanos —los cocodrilos y los pterosaurios voladores— formaban el grupo dominante de los arcosaurios. En la actualidad sólo quedan los cocodrilos como humilde muestra de aquel apogeo de la evolución reptiliana.

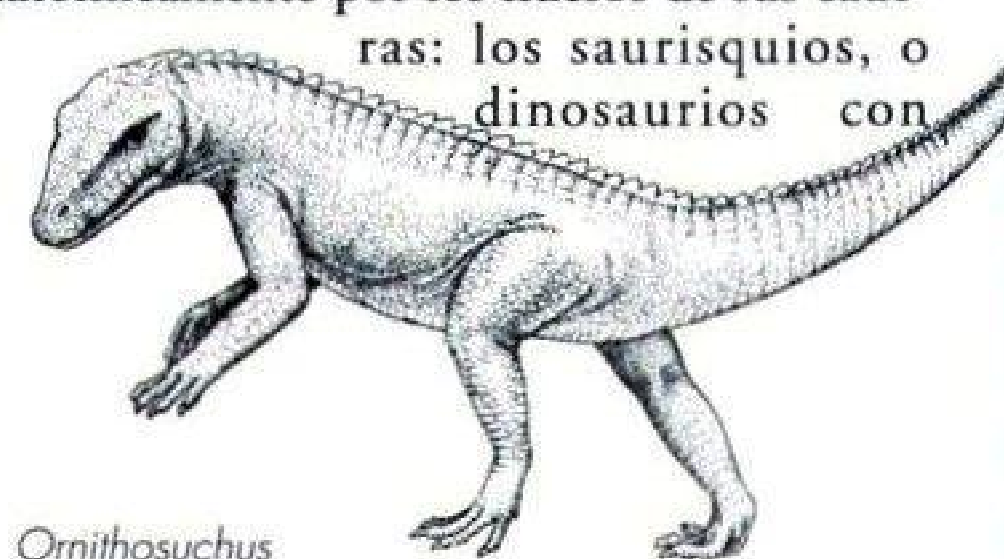
Dicha evolución comenzó a finales del Pérmico, hace unos 250 millones de años. Surgió entonces un nuevo grupo de reptiles, los eosuquios o «cocodrilos del amanecer», que posteriormente se diversificó formando un variado y próspero grupo de animales conocidos como tecodontos o «reptiles con dientes en alvéolos». Casi todos eran grandes carnívoros que se desplazaban a cuatro patas como los reptiles actuales. Un ejemplo típico es el *Erythrosuchus*. Pero también evolucionaron tecodontos capaces de caminar a dos patas, como el *Ornithosuchus*, y de éstos derivaron los dinosaurios. Los cocodrilos y los pterosaurios voladores descendieron de otros grupos de tecodontos. Por otra parte, un grupo diferente de antepasados eosuquios dio lugar a las líneas evolutivas de las que descienden los lagartos y las serpientes.

Pero los que verdaderamente dominaron la tierra fueron los dinosaurios. Desde hace unos 200 millones de años —poco después de haber evolucionado a partir de los tecodontos— hasta su extinción definitiva a finales del Cretácico, hace unos 65 millones de años, los dinosaurios ocuparon casi todos los nichos disponibles para animales terrestres de cierto tamaño. Los había carnívoros, herbívoros y omnívoros, y su tamaño variaba desde el de un gato doméstico hasta formas gigantescas, las más grandes que hayan vivido jamás en tierra firme.

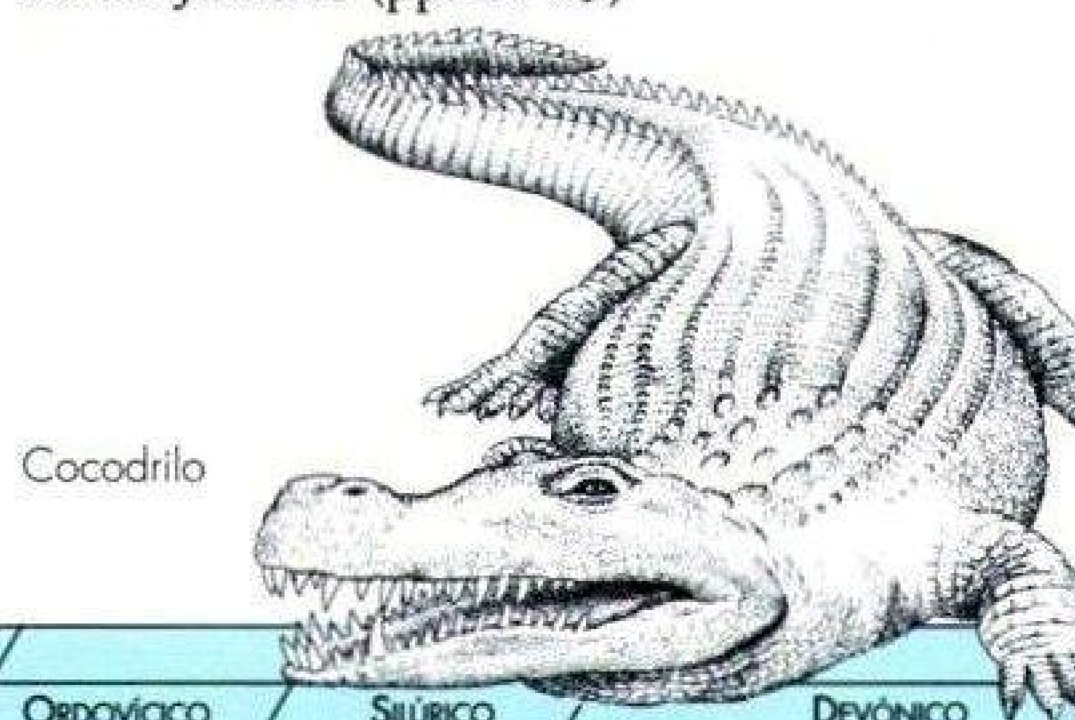


Brachiosaurus

Los dinosaurios se diferenciaron en dos grupos principales, que se pueden distinguir anatómicamente por los huesos de sus caderas: los saurisquios, o dinosaurios con «caderas de lagarto», y los ornitisquios, con «caderas de ave». Al primer grupo pertenecía el *Tyrannosaurus*, probablemente el carnívoro más grande que jamás ha existido, y también otros muchos carnívoros pequeños, la mayoría de los cuales corría a dos patas. Se cree que a partir de estos pequeños dinosaurios carnívoros evolucionó la primera ave conocida, el *Archaeopteryx*, a finales del Jurásico (pp. 24-25)



Ornithosuchus



Cocodrilo

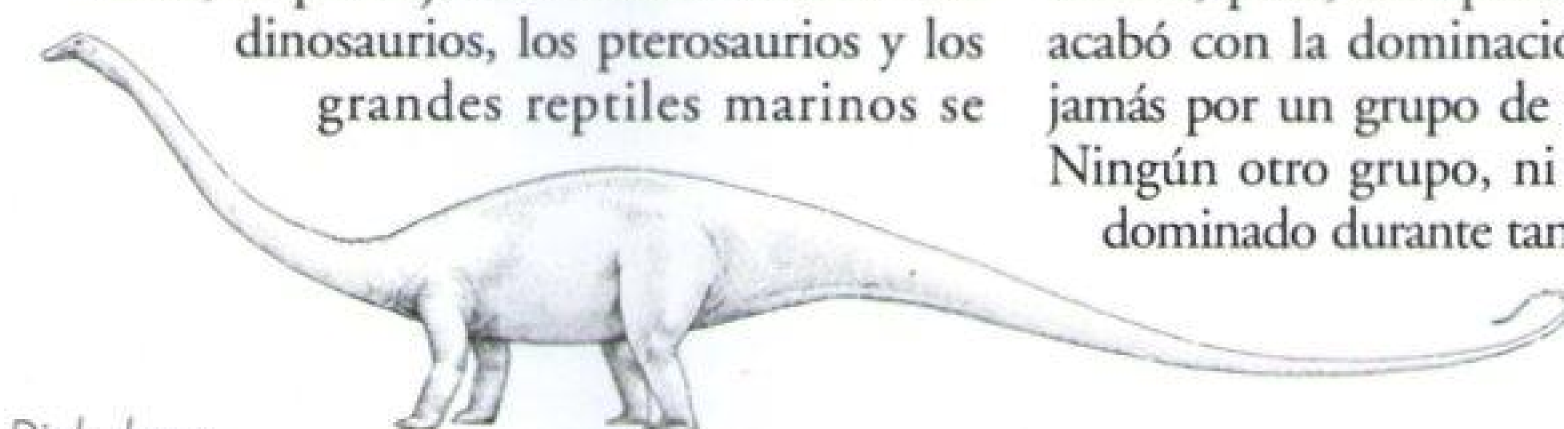


Un *Protoceratops* defendiendo su nido contra un *Oviraptor* que intenta robar sus huevos. Ambos dinosaurios vivieron en Asia durante el Cretácico. El *Protoceratops* era un herbívoro corpulento, y el *Oviraptor* un carnívoro de movimientos rápidos.

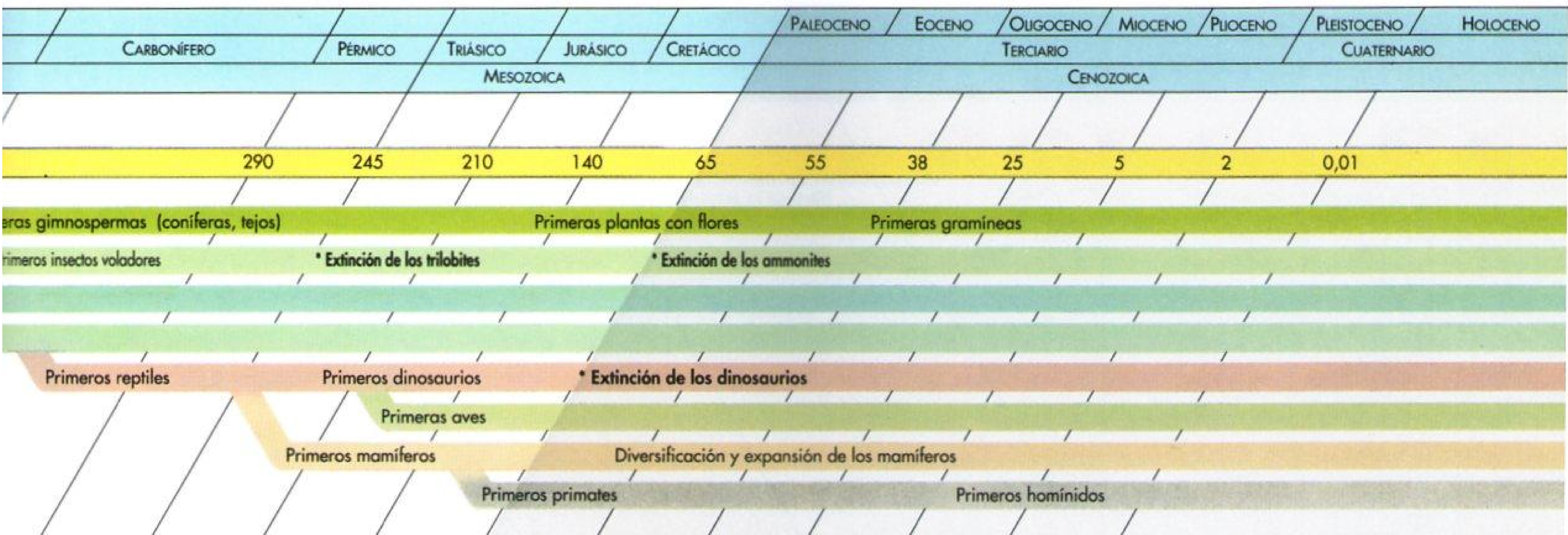
También pertenecían a este grupo herbívoros gigantescos, como el *Diplodocus* y el *Brachiosaurus*, que fueron los animales terrestres más grandes que jamás han existido.

Muchos de los dinosaurios ornitisquios eran herbívoros que aprovecharon la gran expansión y diversificación de las plantas con flores durante el Cretácico. Sus mandíbulas y dientes estaban muy especializados para la alimentación a base de follaje. A este grupo pertenecieron dinosaurios como el *Iguanodon*, el *Stegosaurus*, el *Triceratops* y los hadrosurios con pico de pato.

A finales del Cretácico, hace 65 millones de años, se produjo un brusco cambio. Los dinosaurios, los pterosaurios y los grandes reptiles marinos se extinguieron por completo. Se han propuesto muchas teorías para explicar esta extinción masiva, pero, cualquiera que fuera su causa, acabó con la dominación más larga ejercida jamás por un grupo de vertebrados terrestres. Ningún otro grupo, ni antes ni después, ha dominado durante tanto tiempo los hábitats de tierra firme.

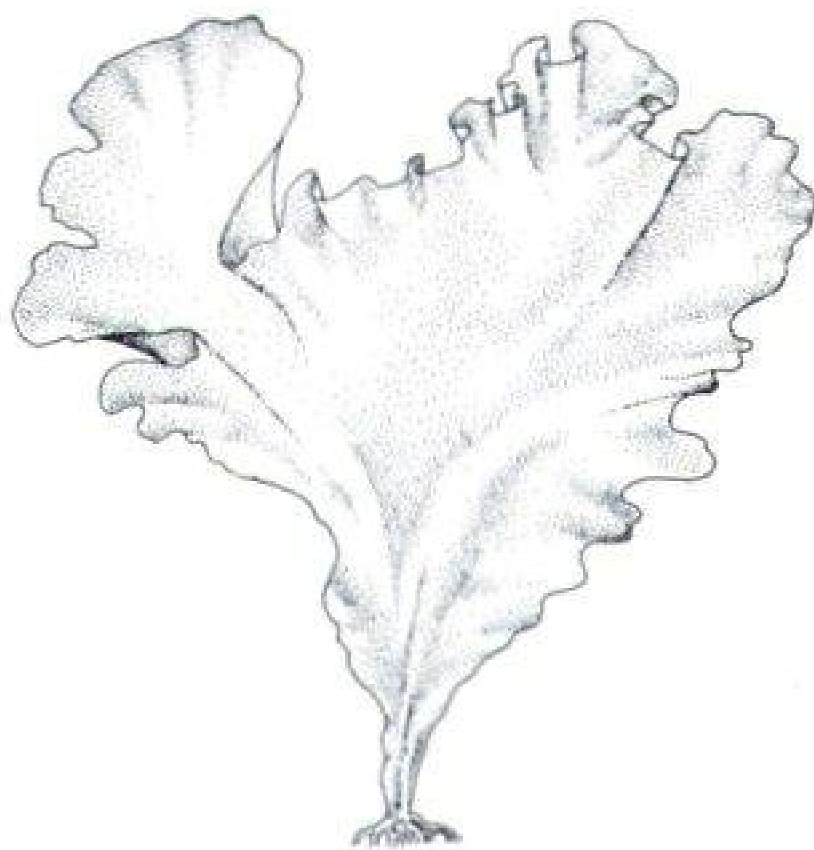


Diplodocus





LA EVOLUCIÓN DE LAS PLANTAS TERRESTRES



Alga marina

Las plantas aparecieron en el mar hace unos mil millones de años. Su posterior evolución, tal como se deduce del testimonio de los fósiles y de los grupos de plantas dominantes en la actualidad, alcanzó su punto culminante cuando conquistaron los numerosos hábitats de tierra firme.

En las aguas superficiales de los mares de finales del Precámbrico, la maquinaria fotosintética de las algas verde-azuladas se incorporó a las células de las primeras algas eucarióticas, probablemente mediante una serie de uniones simbióticas (pp. 28-29). En el período Cámbrico, estos eucariontes ancestrales habían evolucionado, diferenciándose en una amplia gama de algas unicelulares y pluricelulares. Sus descendientes siguen prosperando en aguas dulces y en ambientes marinos. Entre ellos figuran las algas verdes (como la *Ulva* o lechuga de mar), las algas rojas, las pardas, y también organismos unicelulares, como las diatomeas, los dinoflagelados y las euglenoideas.

Hace unos 400 millones de años, en la superficie terrestre del planeta, anteriormente despoblada, vivían ya por lo menos dos tipos de plantas no enteramente acuáticas. Uno de ellos, representado por el fósil *Sporogonites*, poseía estructuras semejantes a raíces rudimentarias, llamadas rizoides, para absorber agua de la tierra en la que crecía. En la punta de los tallos verticales se formaban esporas que, al dispersarse, se transformaban en nuevas plantas.



Helecho con semillas

El segundo tipo, representado por el fósil *Cooksonia*, había desarrollado vasos de xilema: tubos huecos formados por celulosa y lignina (pp. 94-95), que proporcionaban un sistema interno de sostén que permitía que la planta creciera erguida, y a la vez servían para transportar a todas las partes de la planta el agua absorbida del suelo. Además, una gruesa capa de células recubría toda la planta, reduciendo la pérdida de agua por evaporación. Estas adaptaciones iniciaron las opciones evolutivas que dieron lugar a una impresionante diversidad de plantas totalmente terrestres, que incluye los licopodios, los equisetos, los helechos, las cicadales, las coníferas y las plantas con flores.



Licopodio

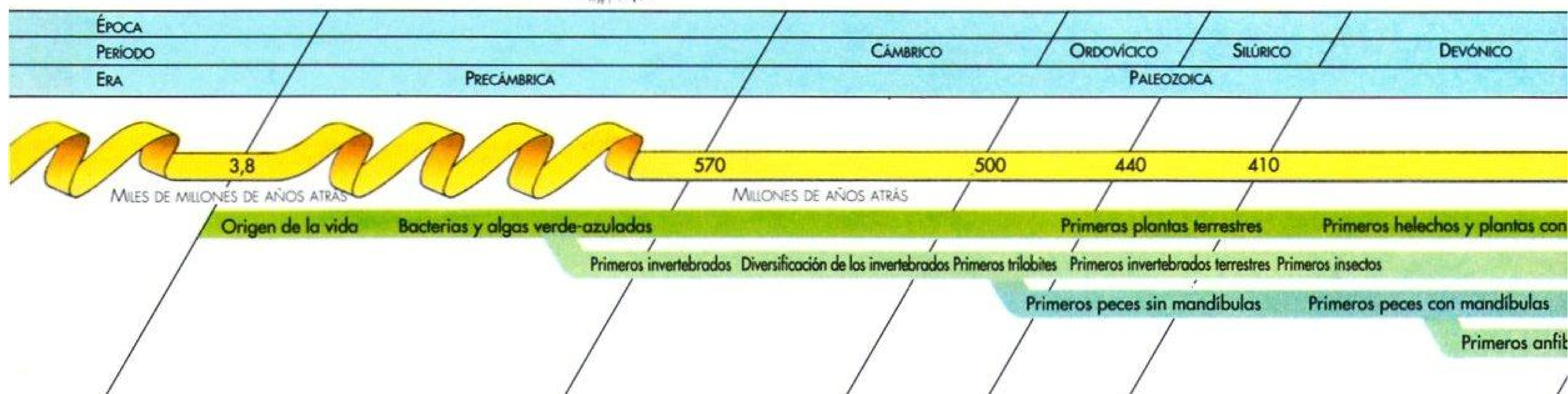
Durante el período Devónico aparecieron los helechos y los equisetos como grupos separados. En el Carbonífero, algunas de sus especies eran arborescentes. El licopodio más grande fue el *Lepidodendron*, que alcanzaba los 45 metros de altura por encima del suelo. Estas plantas se reproducían por medio de esporas, y su ciclo vital era bastante complicado (ver recuadro), ya que se alternaban dos generaciones: un esporofito diploide y un gametofito haploide.

Posteriormente evolucionaron los helechos con semillas y las gimnospermas como las coníferas, que combinaban el ciclo de dos generaciones en una misma planta. La generación haploide que produce gametos se conservó como un órgano reproductivo en la planta diploide, mucho más grande. El resultado fue que las gimnospermas fueron las primeras plantas con semillas en lugar de esporas. El polen de los órganos masculinos, arrastrado por el viento, fecundaba los óvulos y éstos se transformaban en semillas. Las semillas de los helechos con semillas, las cicadales, las ginkoíneas y las coníferas como la *Araucaria* desarrollaron cubiertas externas impermeables y reservas internas de alimentos. Gracias a estas adaptaciones, las semillas resultaban más resistentes que las esporas, lo cual les permitía sobrevivir a los períodos de sequía antes de germinar y transformarse en nuevas plantas.

Las plantas con flores, o angiospermas, evolu-

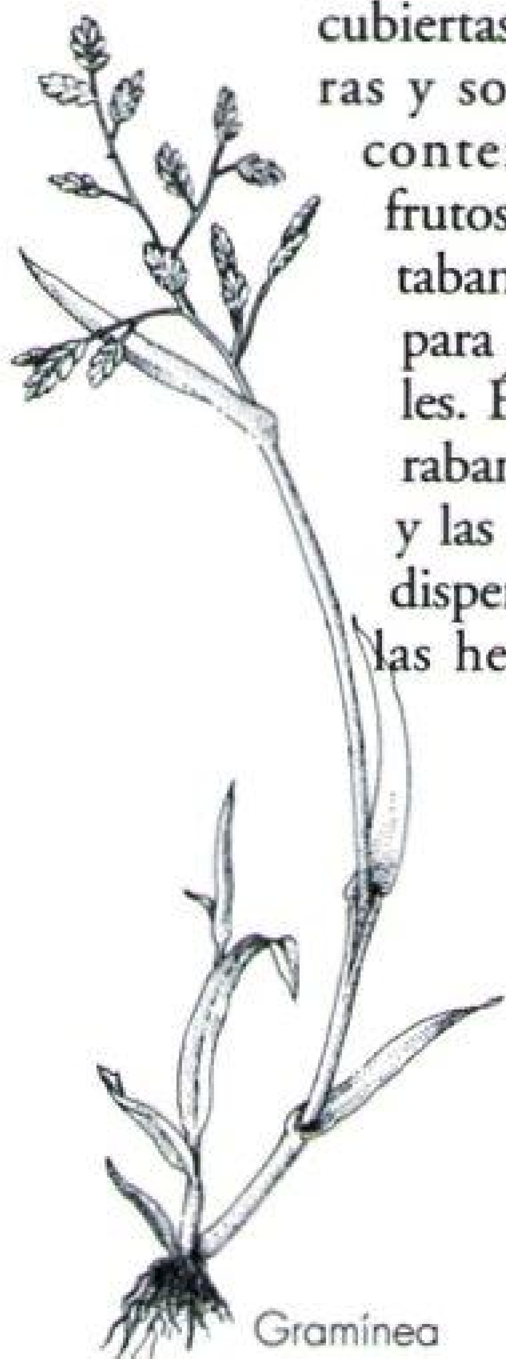


Gimnosperma (*Araucaria*)



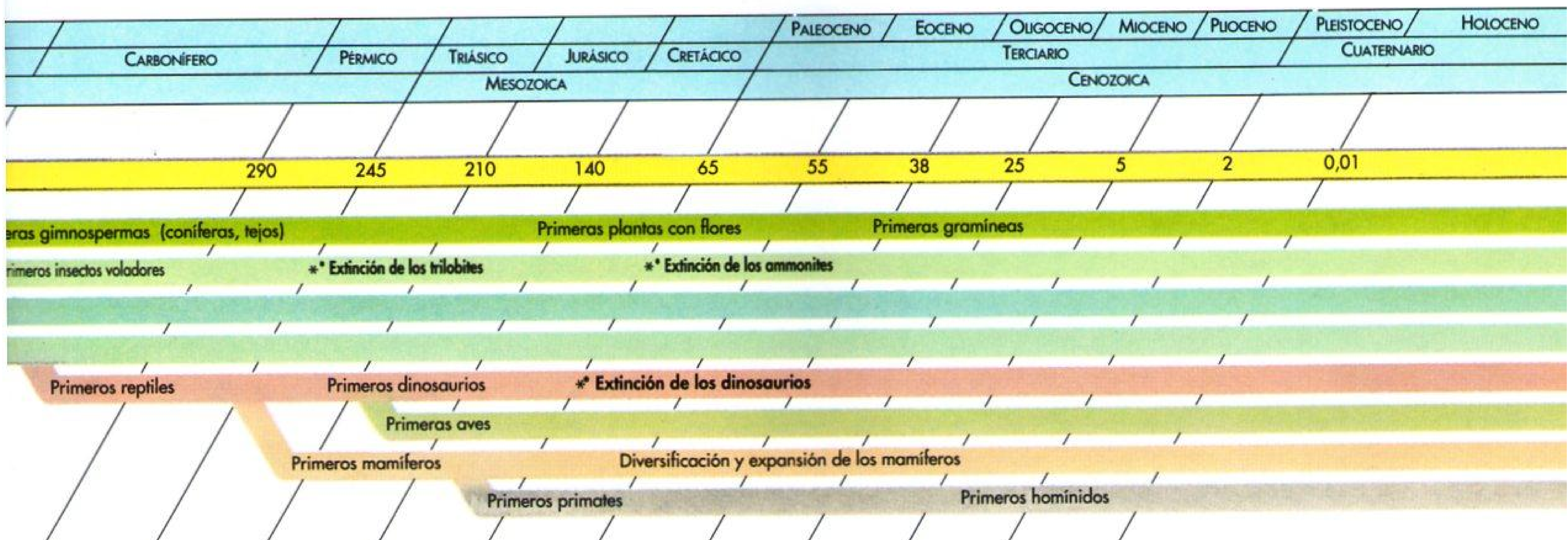

Planta con flores (magnolia)

cionaron durante el período Cretácico, dotadas de estas estrategias reproductivas. A comienzos del Terciario, el éxito de las flores como órganos reproductivos permitió que angiospermas como los magnolios dominaran las comunidades vegetales. Los sépalos y los pétalos de las flores de las angiospermas debieron evolucionar a partir de hojas modificadas. Los óvulos quedaron completamente encerrados en una cubierta protectora o carpelo. Para poder efectuar la polinización, el grano de polen debía caer sobre un estigma —una prolongación pegajosa del carpelo— y formar un tubo polínico que penetrara en el estilo hasta llegar al óvulo y fecundarlo. Las semillas así producidas poseían cubiertas protectoras y solían estar contenidas en frutos que resultaban atractivos para los animales. Éstos devoraban los frutos y las semillas se dispersaban con las heces de los animales.


Gramínea

Gametofito
Esporas
Órgano femenino
Órgano masculino
Raíces
Órgano productor de esporas
El esporofito se desarrolla
El gametofito muere
Raíces
Fronde del esporofito

En la vida de un helecho se alternan una fase sexual y otra asexual. La planta frondosa que todos conocemos corresponde a la fase asexual y se llama esporofito, porque en su cara inferior se encuentran los órganos productores de esporas.
Dichas esporas se forman sin conjugación sexual. Después de dispersarse, cada espora puede desarrollarse hasta formar un pequeño gametofito, que posee órganos sexuales masculinos y femeninos. Los gametos masculinos (espermatozoides) nadan sobre la humedad que cubre el gametofito, hasta llegar a los órganos femeninos y fecundar los óvulos que éstos contienen. Los zigotos dan lugar a nuevos esporofitos, con frondes y raíces, con lo que se completa el ciclo vital y la alternancia de generaciones entre el esporofito, producido sexualmente, y el gametofito, producido asexualmente.





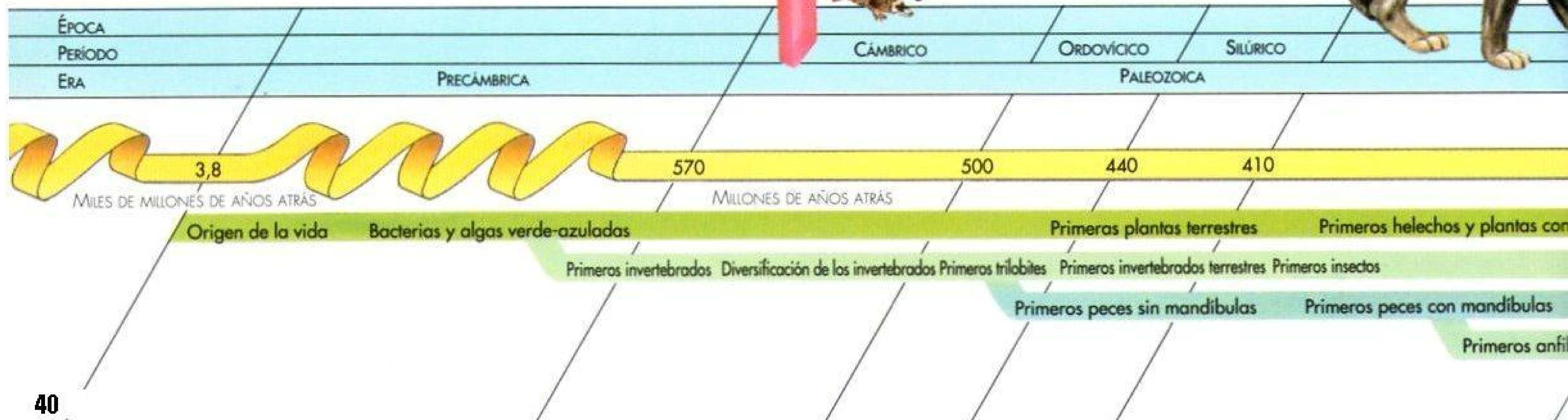
VIDA Y CAMBIO

EL TRIUNFO DE LOS MAMÍFEROS

Hace unos 65 millones de años, una catástrofe global alteró el curso de la evolución. Se extinguieron todos los dinosaurios, pterosaurios y grandes reptiles marinos y dio comienzo la era de los mamíferos. El éxito de este grupo demuestra con toda claridad la capacidad de la evolución para producir, si se le da la oportunidad, una enorme variedad de formas especializadas a partir de un mismo diseño corporal básico.

No resulta fácil explicar las razones de

1 *Pachycephalosaurus*, 2 *Pteranodon*, 3 *Parasaurolophus*, 4 *Alamosaurus*, 5 *Triceratops*, 6 *Tyrannosaurus*, 7 *Quetzalcoatlus*, 8 *Purgatorius*, 9 *Champosaurus*, 10 *Deinosuchus*, 11 *Ptilodus*, 12 *Thescelosaurus*, 13 *Presbyornis*; 14 *Archelon*, 15 *Ichthyornis*, 16 *Embolotherium*, 17 *Doedicurus*, 18 *Phorusrhacus*, 19 *Macrauchenia*, 20 *Megatherium*, 21 *Thylocosmilus*, 22 *Hyaenodon*, 23 *Arsinotherium*, 24 *Megaceros*, 25 Elefante; 26 Rinoceronte; 27 Avestruz; 28 Gacela; 29 Pigargo cabeciblanco; 30 Bisonte; 31 Murciélago frugívoro; 32 Cocodrilo; 33 Jirafa; 34 Chimpancé; 35 Tigre; 36 Canguro.



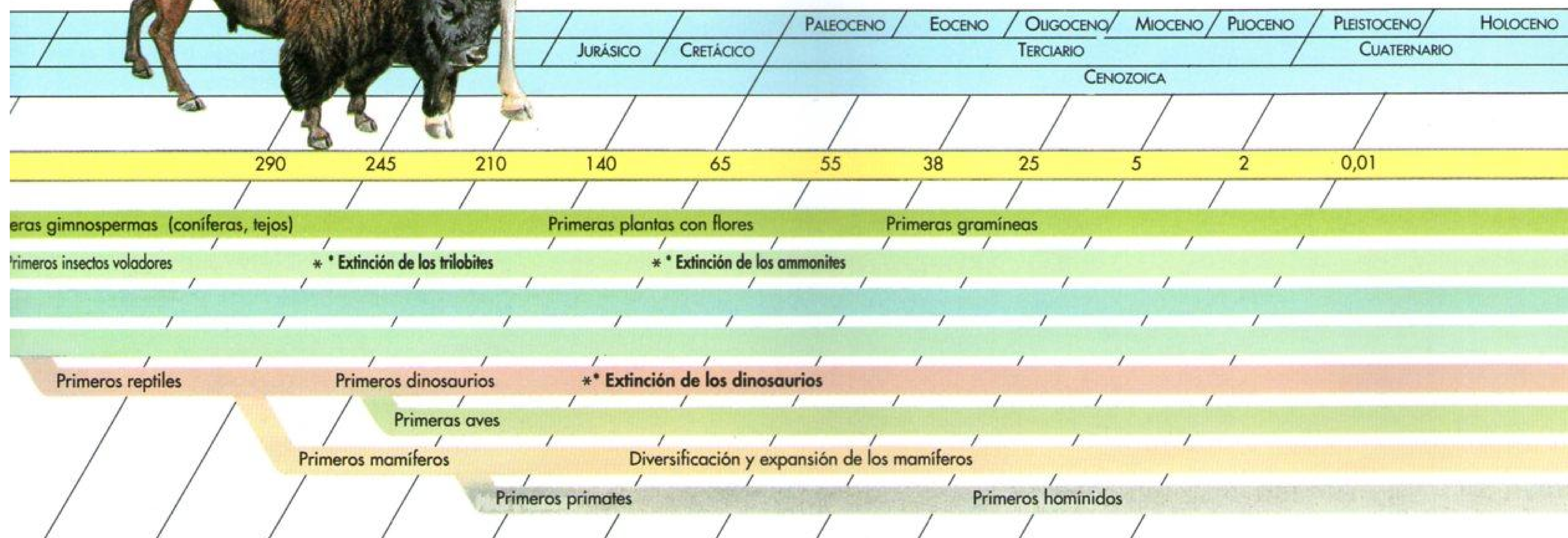
este tremendo giro en la evolución de los vertebrados, pero una de las hipótesis más aceptadas sostiene que el impacto de uno o varios objetos gigantescos procedentes del espacio provocó una perturbación global del clima de la Tierra (pp. 184-85). Las plantas murieron en enormes cantidades, y con ellas los animales herbívoros y sus depredadores. Los dinosaurios fueron incapaces de sobrevivir a semejante catástrofe.

Los pequeños mamíferos llevaban millones de años conviviendo con los dinosaurios. Los primeros habían aparecido casi al mismo tiempo que los dinosaurios, hace unos 200 millones de años, pero existían muy pocos nichos que pudieran ocupar, ya que los hábitats terrestres estaban acaparados por los dinosaurios.

El origen de los mamíferos se remonta a las primeras etapas de la evolución de los reptiles, mucho antes de que aparecieran los dinosaurios. Sus antepasados reptiles —los terápsidos—, que existían desde finales del Carbonífero, presentaban un tipo de cráneo similar al de los mamíferos, con una sola abertura detrás de las cuencas oculares, que permitió el desarrollo de músculos muy eficientes para cerrar las mandíbulas, aumentando la eficacia de éstas. A principios del Triásico, algunos terápsidos, como el *Cynognathus*, tenían ya aspecto de mamíferos, e incluso es posible que tuvieran pelo en el cuerpo.

A finales del Triásico, hace unos 190 millones de años, los primeros mamíferos habían evolucionado ya a partir de los terápsidos y convivían con los dinosaurios, aguardando su momento. Estos primitivos mamíferos eran animales pequeños e insignificantes, parecidos a musarañas, que vivían entre la vegetación espesa, bajo las rocas o en profundas madrigueras, alimentándose principalmente de insectos y otros invertebrados pequeños. Como eran animales de sangre caliente, podían actuar durante las horas más frescas de la noche, cuando muchos de los dinosaurios de sangre fría permanecían inactivos.

Al producirse la catástrofe, parece que estos pequeños animales resultaron menos afectados que los dinosaurios, más especializados. Al desaparecer éstos, los mamíferos se encontraron de pronto con enormes oportunidades evolutivas y se desplegó su potencial para la especialización, que les permitió evolucionar hasta la multitud de formas que hoy conocemos.



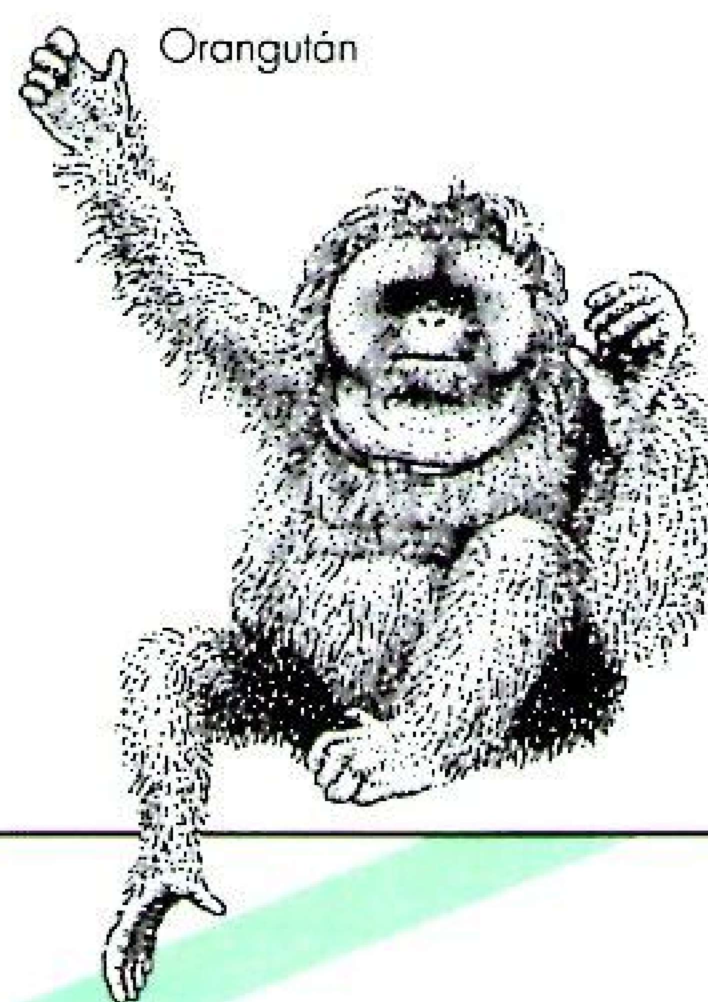


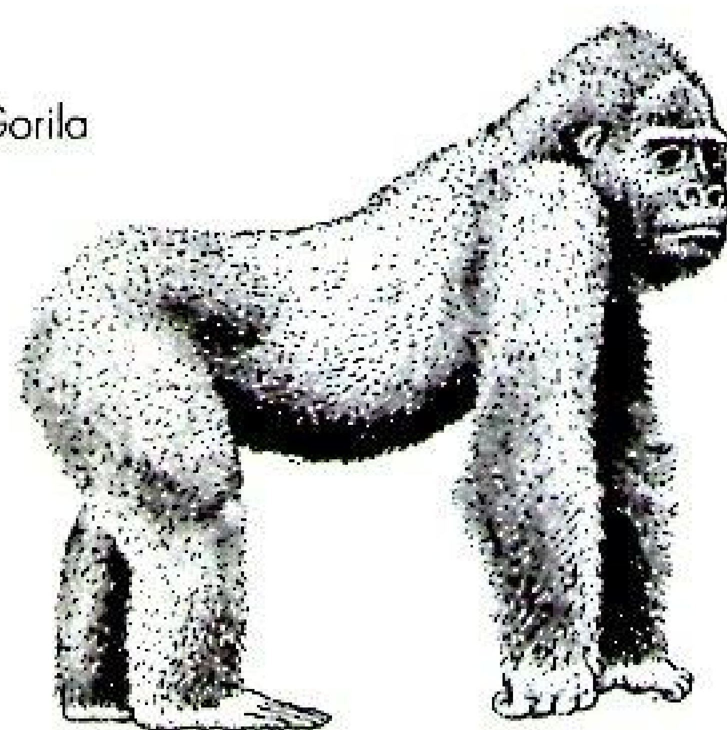
Colobo
Época actual
Mono araña
Babuino
Tarsio
10
20
Millones de años atrás
30
40
50
Prosimios
Monos del Nuevo Mundo
Monos del Viejo Mundo
Hominoideos

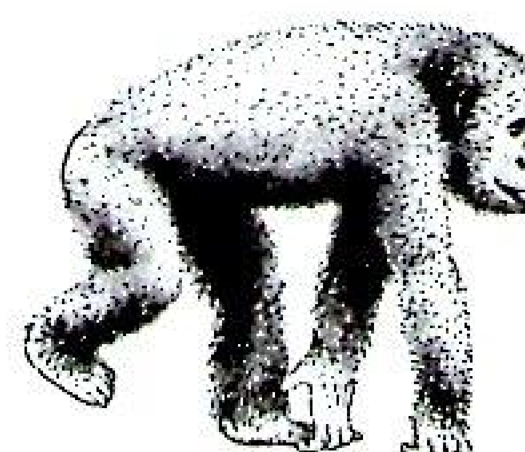
Árbol evolutivo de la diversificación de los grupos de primates. Al comienzo del proceso, hace unos 50 millones de años, se diferenciaron tres líneas evolutivas: los prosimios (cuyos representantes actuales son los lemures, lorísidos y tarsios), los monos del Nuevo Mundo y los monos del Viejo Mundo. El grupo de los hominoideos, que incluye al hombre y los antropoides, se deriva de los monos del Viejo Mundo.

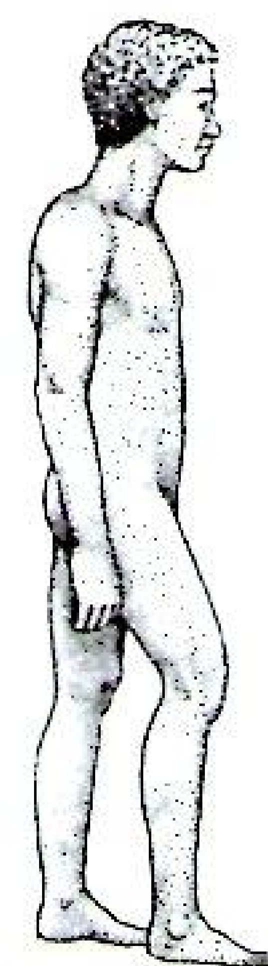
«La estructura corporal humana presenta tantas similitudes con la de los animales inferiores que parece asombroso que se haya podido dudar del parentesco. Anatómicamente, el hombre es un animal más». Son palabras de sir Wilfred Le Gros Clark, profesor emérito de anatomía en la Universidad de Oxford, y miembro del grupo internacional de paleontólogos que han desentrañado los orígenes de nuestra especie.

El *Homo sapiens* es un mamífero, una de las 185 especies vivientes del orden de los









primates. Y en la evolución de los otros primates es donde se encuentra la clave para averiguar los orígenes de la especie humana.

Los primates actuales se dividen en cuatro grupos principales: los prosimios (lemures, tarsios, lorísidos y gálagos); los monos del Nuevo Mundo (por ejemplo, titíes, monos aulladores y monos araña); los monos del Viejo Mundo (babuinos y macacos, entre otros) y los primates superiores, que incluyen a los antropoides y al hombre. Con unas pocas excepciones, los primates viven en las regiones tropicales y subtropicales, por lo general en zonas boscosas. Por su origen y su estructura física general, los primates parecen ser básicamente animales arborícolas.

Muchos aspectos de la anatomía y fisiología de los primates pueden interpretarse como adaptaciones evolutivas a la vida en los árboles. Las manos y los pies tienen cinco dedos sensibles y móviles, para agarrarse a las ramas. Los dientes y el aparato digestivo están adaptados a la alimentación vegetal. Como tienen que moverse con agilidad y precisión por las copas de los árboles, los primates poseen una vista excelente. La mayoría tiene el hocico corto y los ojos orientados hacia delante, lo que les proporciona una visión estereoscópica de gran precisión. En comparación con otros mamíferos, los primates tienen mejor vista y peor olfato. Los cerebros de los primates superiores —los antropoides— son más grandes y complejos que los de otros mamíferos. Seguramente también esto está relacionado con la necesidad de efectuar movimientos rápidos y coordinados a través de las ramas de los árboles.

Casi todos los primates llevan una vida familiar muy estructurada. Tienen pocos hijos cada vez —sólo uno por parto— y los amamantan durante mucho tiempo. El que las camadas sean pequeñas presenta evidentes ventajas adaptativas: viviendo en los árboles, resultaría difícil transportar y alimentar a un gran número de crías. Además, los primates son animales sociales. Su capacidad visual y su gran cerebro los han preadaptado para la transmisión de señales, la comunicación y la organización en grupo.

Probablemente, los primates evolucionaron a partir de antepasados semejantes a las musarañas, hacia el final del Cretácico, hace unos 70 millones de años, en Europa o Norteamérica. La transición desde las musarañas arborícolas a los verdaderos primates tuvo lugar en ambientes aún dominados por los dinosaurios. Gracias a la evolución de las plantas con flores, había más árboles que nunca, pero los dinosaurios no vivían en los árboles, de manera que quedaban nichos vacantes, que fueron ocupados por aquellos primitivos mamíferos.

Sin embargo, otras teorías acerca del origen de los primates niegan la relación con los árboles y sitúan a las primeras especies a ras del suelo, alegando que la habilidad de las manos y los ojos dirigidos hacia delante fueron adaptaciones para localizar y atrapar insectos, y no para desplazarse por las ramas.

A partir de la extinción de los dinosaurios, hace unos 60 millones de años, los primitivos prosimios (similares a los lemures y tarsios) se diversificaron con rapidez. Los más avanzados (simios y antropoides) evolucionaron hace unos 50 millones de años. Se distinguen de los demás primates por su cráneo redondeado (que encierra un cerebro voluminoso), por poseer sólo dos pezones en el pecho y por sus uñas planas, en lugar de garras. Algunas especies andan o corren a cuatro patas, otras usan sus poderosos brazos para columpiarse de árbol en árbol. Muchos son capaces de ponerse a dos patas, dejando las manos libres para manipular la comida.

Los monos del Nuevo y del Viejo Mundo presentan numerosas similitudes, porque probablemente evolucionaron a partir de varios grupos similares de prosimios, semejantes a los tarsios. Sin embargo, los monos del Nuevo Mundo tienen los orificios nasales bien separados y orientados hacia los lados, y muchos poseen colas prensiles, capaces de soportar el peso del cuerpo. En cambio, los monos del Viejo Mundo tienen los orificios nasales juntos y dirigidos hacia abajo, y sus colas no son prensiles.

Los antropoides evolucionaron a partir de monos del Viejo Mundo. A esta rama, la más reciente del árbol genealógico de los primates, pertenece el *Homo sapiens.*

Es muy raro encontrar restos fósiles de

primates. Probablemente, los primates siempre han vivido en regiones tropicales, donde se forman pocos sedimentos y casi todos los cadáveres son destruidos por los depredadores y la descomposición. No obstante, los pocos fósiles que se han encontrado permiten elaborar un esquema básico de los orígenes de la especie humana.

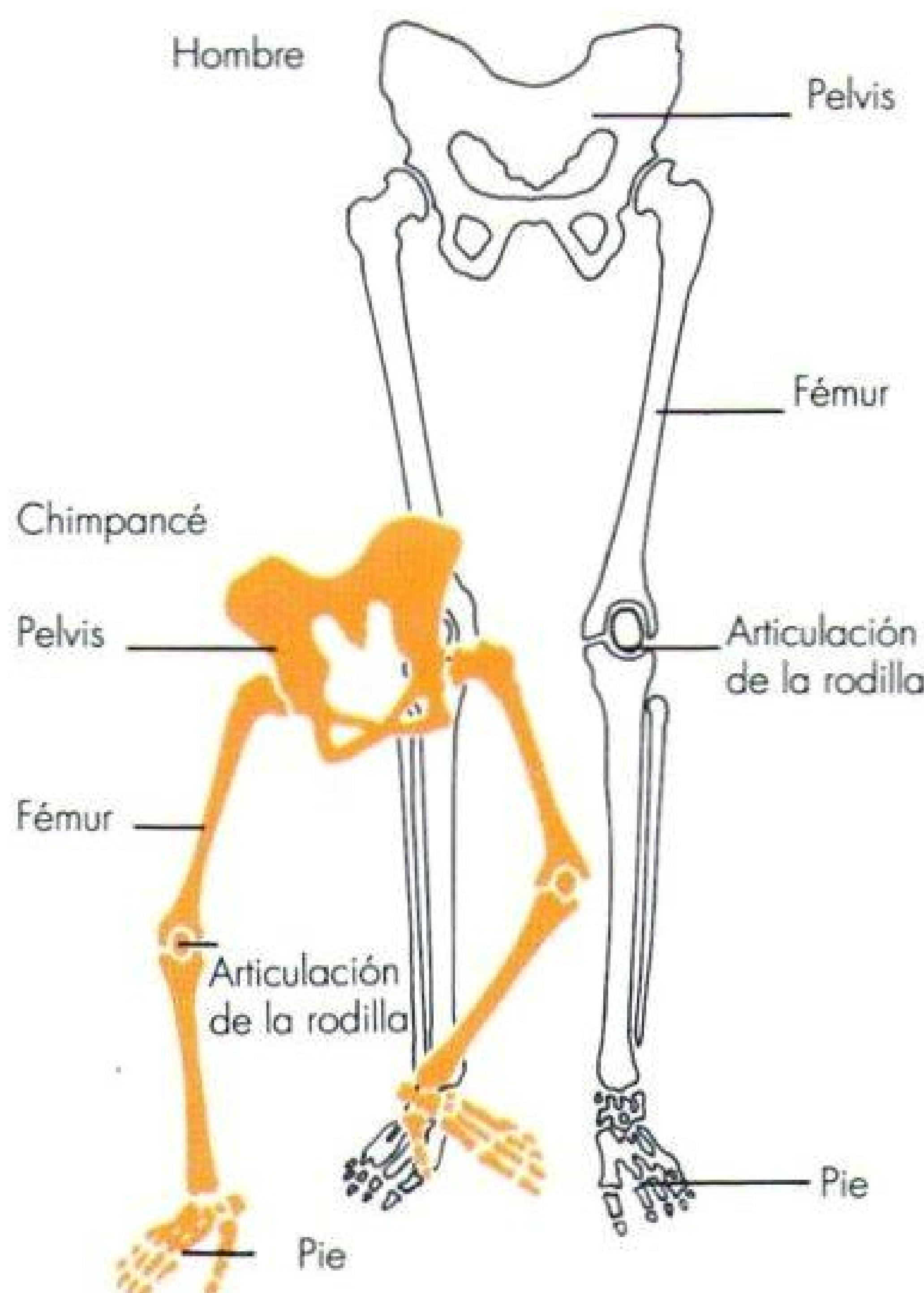
En la actualidad, los primates inferiores son muy superiores en número a los superiores. Pero hace 20 millones de años se daba la situación contraria: los antropoides eran más numerosos y presentaban tanta diversidad de aspectos y modos de vida como los monos actuales. Estas especies vivían sólo en África, pero hace 18 millones de años, cuando África volvió a unirse con Eurasia, los primates más avanzados pudieron pasar de un continente a otro. Los fósiles que se formaron poco después de esta época presentan características que muchos paleontólogos identifican como propias de la línea evolutiva de la que surgió nuestra especie.

Entre 1960 y 1980 se creía que nuestro primer antepasado fue el *Ramapithecus*, que vivió en Europa y Asia hace unos 15 millones de años. Su rostro achatado, fuertes mandíbulas y dientes esmaltados presentaban grandes similitudes con los de los homínidos. Sin embargo, los recientes estudios del ADN han demostrado que es muy improbable que el *Ramapithecus* fuera un antepasado directo del hombre. Ahora se cree que la gran divergencia de los simios y los homínidos ocurrió en tiempos más recientes, hace de cinco a ocho millones de años, por lo que el *Ramapithecus* resulta demasiado antiguo para representar la transición. Un candidato mucho más probable es el *Australopithecus afarensis*, un animal parecido a un pequeño chimpancé bípedo, que vivió hace cuatro millones de años y pudo haber sido el antepasado directo de los seres humanos.

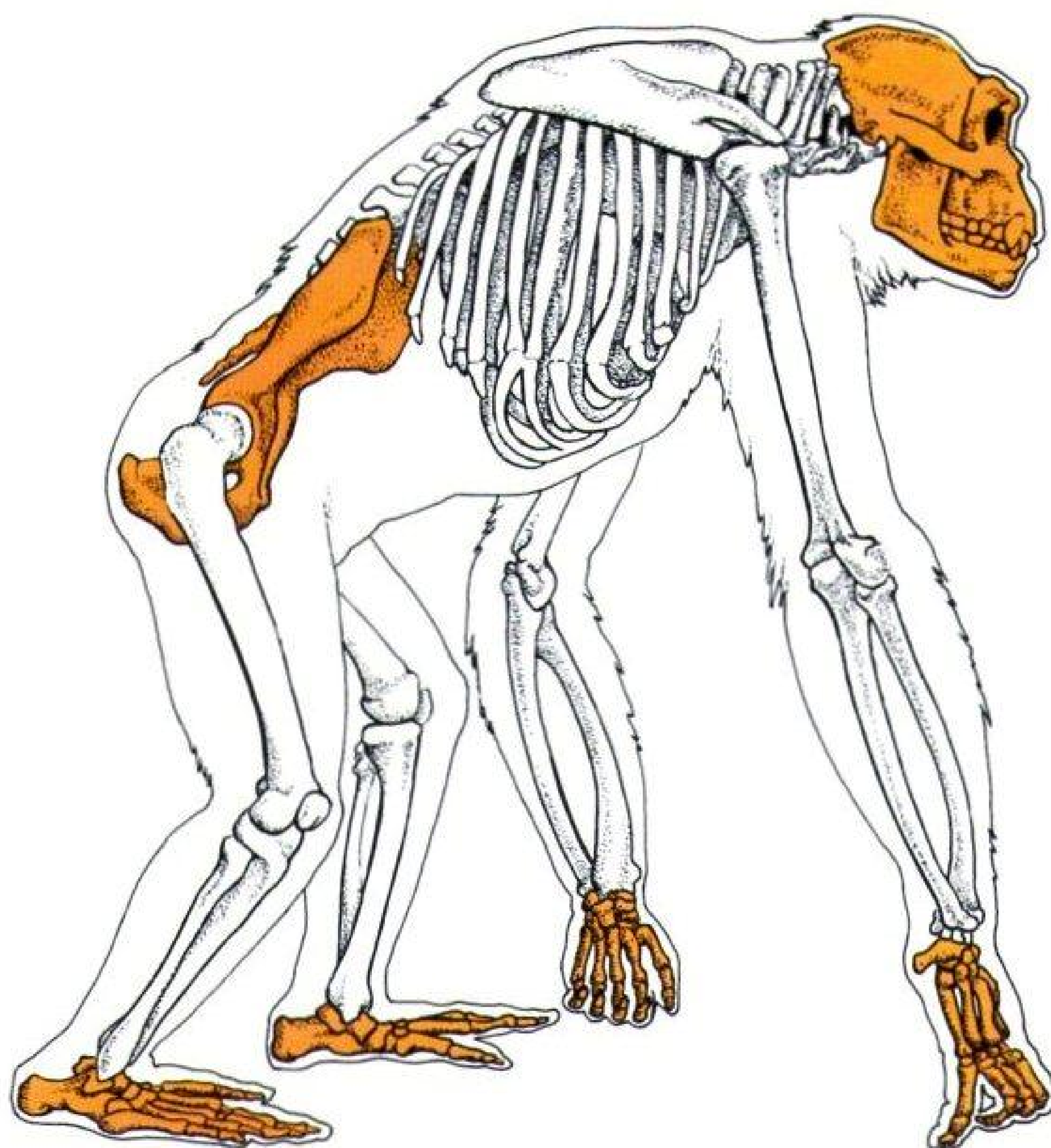
Los estudios del ADN humano y de los antropoides modernos indican que los gorilas y chimpancés son nuestros parientes vivos más cercanos. El ADN de un chimpancé, por ejemplo, es idéntico al humano en un 98 por 100. La comparación de los esqueletos del hombre, el chimpancé y el gorila demuestra que los seres humanos poseen cuerpos de simio adaptados al bipedismo. La parte inferior del cuerpo humano ha evolucionado para facilitar la distribución del peso y el equilibrio necesario para caminar erguido a dos patas.

Un elemento fundamental en esta pauta evolutiva es la forma de la pelvis, y también el ángulo que forma el fémur con la parte superior de la rodilla. En los antropoides, el fémur y la sección inferior de la pierna están en línea recta. En los seres humanos forman un ángulo, que permite situar ambos pies bajo el centro de gravedad del cuerpo para caminar erguido. Curiosamente, el *Australopithecus afarensis* tenía piernas de tipo humano, lo cual parece indicar que caminaba a dos patas la mayor parte del tiempo. Otra adaptación humana al bipedismo es la simplificación del pie, que deja de ser un órgano prensil con pulgar oponible para transformarse en una simple plataforma plana y flexible para caminar.

A paso normal, el bipedismo es un método de locomoción más eficiente que la marcha a cuatro patas, en cuanto a ahorro de energía. Posiblemente, esta adaptación convirtió a los homínidos omnívoros en forrajeros más efectivos, pero sus consecuencias llegaron mucho más lejos. Al caminar y correr a dos patas, las manos quedaron libres para efectuar delicadas manipulaciones de un nivel sin precedentes. En un primate que ya poseía adaptaciones como coordinación precisa, estructuras sociales, buena vista y cerebro grande, esta oportunidad evolutiva favoreció el uso



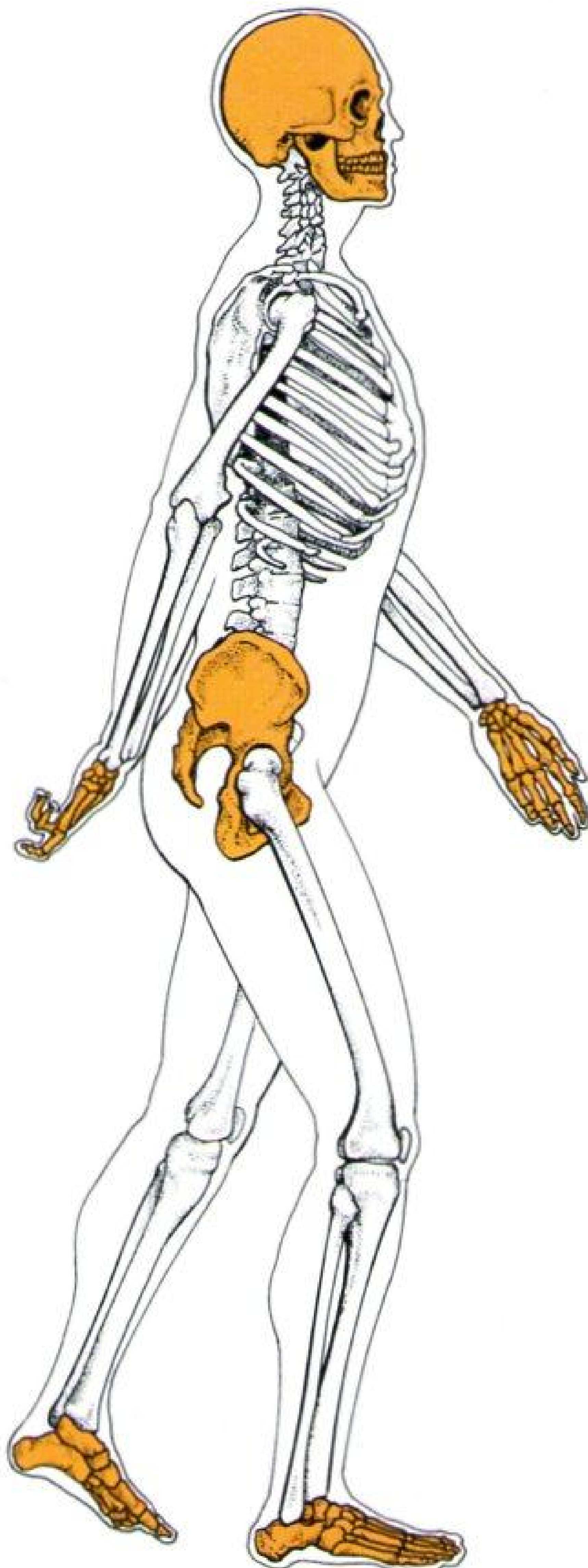
La capacidad de caminar habitualmente a dos patas debió ser una de las primeras características que diferenciaron la línea evolutiva humana de la de los otros simios. La pelvis aplanada de los humanos permite la inserción de músculos que confieren estabilidad a la postura erguida. Los fémures se insertan en ángulo hacia dentro, para poder mantener las extremidades traseras en posición vertical bajo el peso del cuerpo. En el chimpancé, la pelvis es más alta y casi todos los músculos se insertan por detrás, para facilitar la locomoción a cuatro patas. Los fémures están dirigidos hacia fuera, y sólo permiten caminar erguido con paso inseguro.



generalizado de utensilios. También otros antropoides, como los chimpancés, usan instrumentos, pero de forma mucho más limitada. En los australopitecinos primero y en los humanos después, este tipo de conducta se fue haciendo cada vez más variada y más importante. El uso de instrumentos acabó por formar parte de casi todas las actividades humanas.

Hace entre dos millones y un millón y medio de años, cuando ya los primeros miembros del género *Homo* habían evolucionado a partir de los australopitecinos africanos, tuvo lugar otro importante avance. Los cráneos fósiles de especies como *Homo habilis*, que utilizaba instrumentos sencillos de piedra, revelan los primeros indicios de este cambio. Aunque la cavidad superior de estos cráneos indica que el volumen de su cerebro era la mitad que el de un humano moderno, los moldes internos revelan un característico abultamiento, que corresponde al área de Broca, la zona de la corteza cerebral responsable del lenguaje, lo cual parece indicar que aquellos homínidos primitivos ya usaban lenguaje articulado. Había aparecido en el planeta un mono bípedo que utilizaba instrumentos y podía hablar. Ya existían verdaderos seres humanos.

La comparación de los esqueletos de un hombre moderno y un gorila permite apreciar varios cambios evolutivos. Se han resaltado las zonas de mayor importancia. Uno de los contrastes más notables es que el ser humano tiene las piernas mucho más largas que los brazos, lo cual es necesario para la locomoción bípeda. El gorila, que suele trepar y caminar a cuatro patas, tiene los brazos más largos que las piernas.



EVOLUCIÓN DEL CRÁNEO

El chimpancé es, probablemente, el pariente vivo más próximo del ser humano, y se pueden sacar interesantes conclusiones de la comparación de su cráneo con los de los homínidos primitivos y el hombre actual. El cráneo del chimpancé presenta una cresta para insertar los potentes músculos del cuello, y la parte inferior del rostro sobresale hacia delante. Los dientes caninos son relativamente grandes (los del macho más que los de la hembra), y la capacidad cerebral es de unos 400 cc.

El cráneo del *Australopithecus afarensis*, el homínido más antiguo conocido, es similar al del chimpancé, aunque el resto de su esqueleto presentaba espectaculares adaptaciones a la postura erguida. La capacidad craneal es muy similar (de 380 a 450 cc) y sigue presentando cresta y caninos grandes.

En el ser humano moderno, tres millones de años después de la época del *A. afarensis*, la capacidad craneal ha aumentado a 1.350 cc, y el cerebro se encuentra encerrado en un cráneo casi esférico, que ha perdido todo rastro de cresta. La parte inferior del rostro es mucho menos protuberante, y los dientes son de tamaño similar.



Chimpancé



Australopithecus afarensis

El cráneo humano es plano por delante, con una cavidad esférica, y se inserta sobre un cuello vertical. En cambio, el cráneo del mono presenta un morro saliente, y se inserta por delante de las vértebras del cuello. Además, tiene grandes crestas para insertar los músculos de las mandíbulas y el cuello.



Homo sapiens moderno



LAS REGLAS DEL CAMBIO



La vida y la evolución están interconectadas. Desde los comienzos de la vida en la Tierra han formado una pareja simbiótica que aún continúa coexistiendo. La vida y la evolución se necesitan una a otra.

Por medio de la evolución, los sistemas vivos van cambiando a lo largo del tiempo, alterándose en respuesta a los cambios ambientales. En su sentido más amplio, de cambio impulsado por la selección natural, la evolución actúa también sobre sistemas no vivos, como los conjuntos interactivos de reacciones químicas. Pero su manifestación más trascendente la realiza al actuar sobre los complicados sistemas de autocopiado de los seres vivos.

Después de más de tres mil millones de años de cambios acumulados, esta interacción de la evolución con la vida en nuestro planeta ha dado lugar a una extraordinaria variedad de formas de vida, organismos que varían desde las bacterias más microscópicas hasta los gigantescos dinosaurios y ballenas. El registro fósil ha permitido reconstruir la historia de estos cambios, cuya última expresión es la diversidad de animales y plantas que existen en la actualidad.

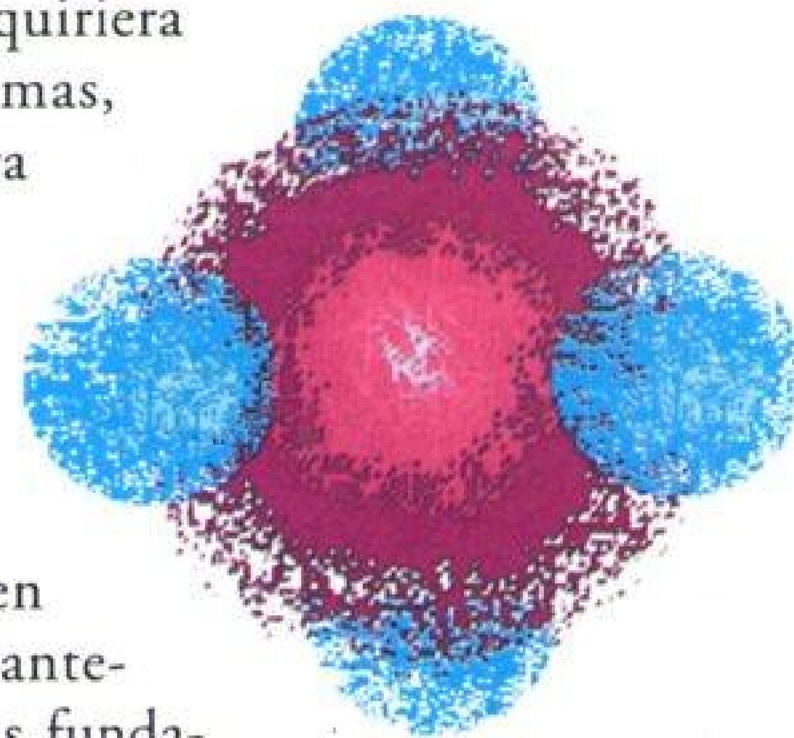


Para comprender los auténticos procesos en los que se han basado estos miles de millones de años de evolución, es preciso adentrarse en temas muy profundos. Primero hay que definir la vida misma, para entender por qué está tan irrevocablemente ligada a la evolución. También hay que determinar cuándo se produjo la aparición de vida a partir de los materiales no vivientes que la precedieron, para lo cual es preciso explicar la vida en términos químicos.

El estudio moderno de la evolución va ligado al del funcionamiento molecular de la vida. La herencia, la reproducción sexual, la selección natural y la adaptación son conceptos que ahora se pueden definir en términos de la biología molecular del ADN.



Los seres vivos son autorregulables y no necesitan programación externa. Un equivalente hipotético de semejante sistema sería una fábrica de automóviles que adquiriera por sí misma las materias primas, realizara los planos, construyera los automóviles, los comercializara, estudiara las respuestas del mercado y —esto es lo más importante— pudiera modificar los diseños para obtener mejores ventas en un mercado que cambia constantemente. Una de las características fundamentales de los seres vivos es su capacidad inherente de cambiar para adaptarse a su entorno, y transmitir estos cambios ventajosos a su descendencia.

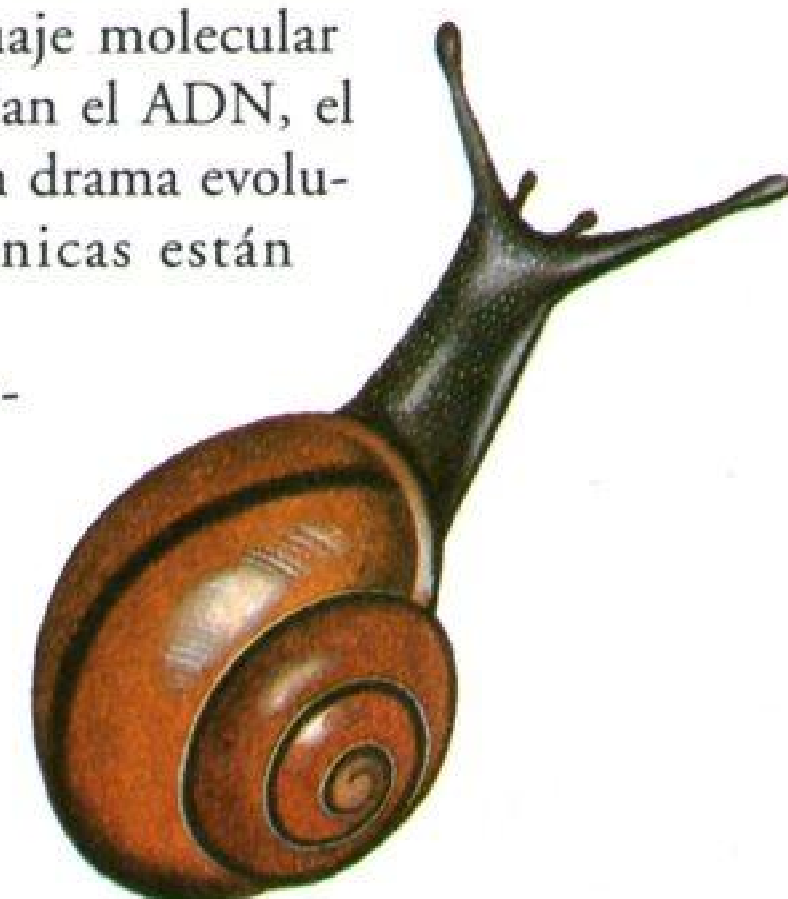


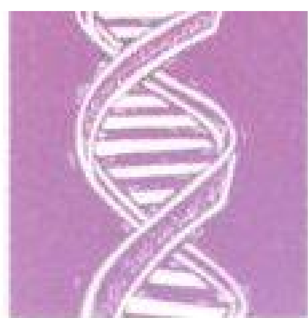
Los cambios se transmiten de padres a hijos codificados en los genes. Los genes, compuestos por ADN, son los códigos que los organismos utilizan para regularse y automantenerse. El conjunto de los genes de un organismo individual, animal o vegetal se denomina genotipo.

La secuencia de las unidades estructurales que forman el ADN codifica —y puede construir— una secuencia correspondiente de aminoácidos. Con estos aminoácidos se fabrica una proteína concreta. La secuencia de aminoácidos determina las características de la proteína y su funcionamiento en el organismo vivo.

La biología molecular moderna ha permitido a los científicos analizar el funcionamiento genético y metabólico de los seres vivos al nivel más básico, el de los átomos y moléculas. El análisis del lenguaje molecular de la vida —el idioma que hablan el ADN, el ARN y las proteínas— revela un drama evolutivo cuyas instrucciones escénicas están escritas en el código genético.

Las mutaciones que se producen en este código —cambios en el ADN que determinan la formación de proteínas distintas— proporcionan la materia prima para el drama; y su acumulación de generación en generación ha dado lugar a la increíble diversidad de la vida en la Tierra.





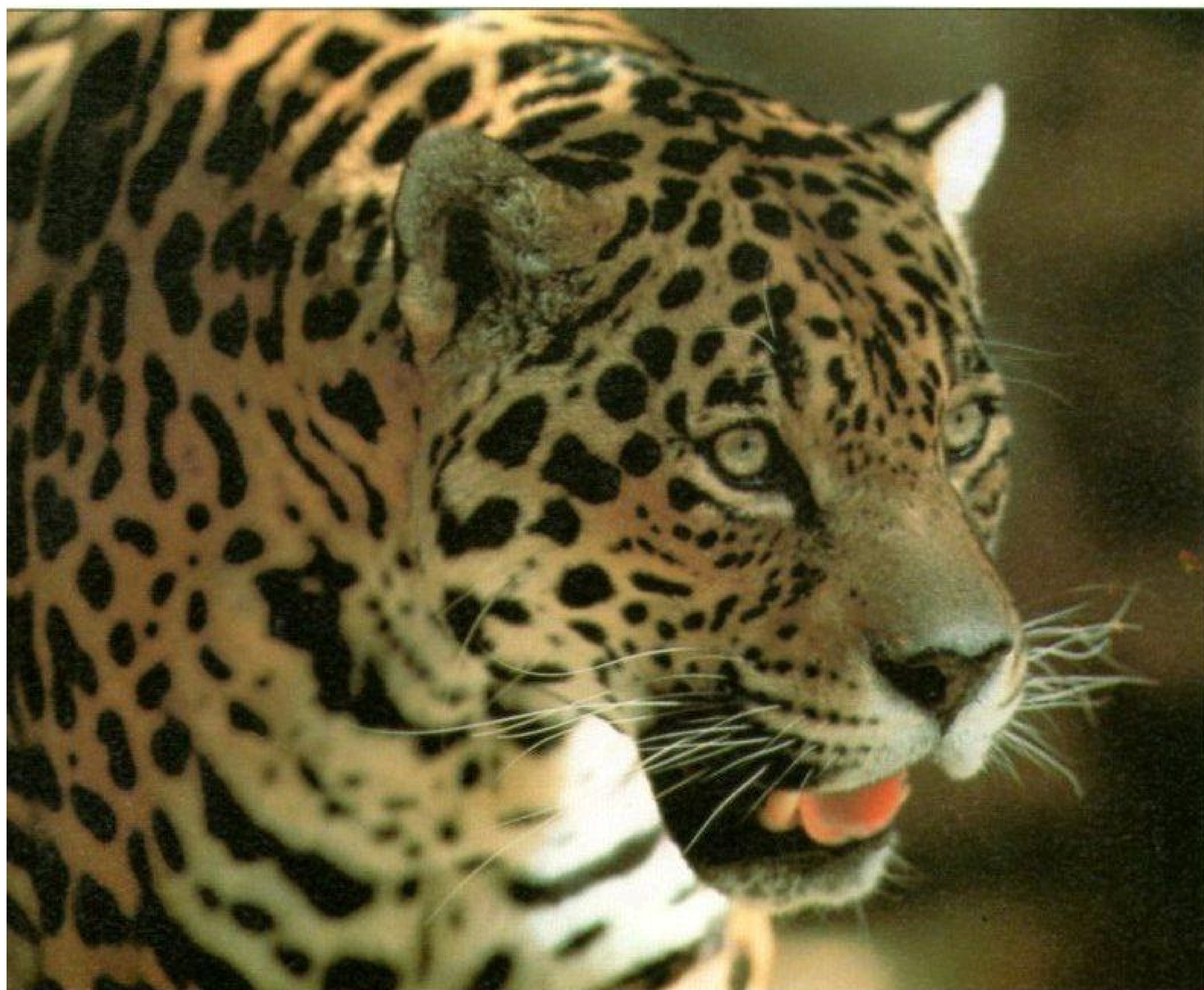
¿QUÉ ES LA VIDA?

Los árboles, los grandes felinos, los gorriones, incluso las pequeñas hormigas y los humildes gusanos son, evidentemente, seres vivos. Pero la vida en nuestro planeta está mucho más diversificada. Las esporas de los hongos, las algas verdes, los organismos microscópicos que bullen en una gota de agua, los protozoos unicelulares, las bacterias y los virus están tan «vivos» como los animales y plantas más visibles. Aunque no podamos verlos, la presencia de estos diminutos organismos se advierte en todas partes. Las plantas se marchitan, se ponen amarillas y mueren, debido a la infección de partículas víricas invisibles; las bacterias agrian la leche; el virus del resfriado nos hace moquear y nos pone los ojos llorosos.

A pesar de su diversidad de formas, todos los seres vivos poseen algunas características comunes, que constituyen el lazo de unión entre todas las formas de vida, desde las bacterias a las grandes ballenas.

La primera y principal es que todos los seres vivos pueden reproducirse, generando copias casi perfectas de sí mismos. Para ello utilizan dos sistemas principales: uno es la reproducción sexual, un sistema que a primera vista parece innecesariamente complicado, ya que exige que en cada especie de organismos existan dos formas diferenciadas: una con órganos que producen óvulos unicelulares y otra con un aparato equivalente para producir espermatozoides también unicelulares. Un óvulo tiene que fusionarse con un espermatozoide para producir una célula compuesta —el huevo fecundado o zigoto—, que se desarrolla hasta transformarse en un nuevo organismo independiente, con todas las características de la especie parental. Algunos organismos, como los caracoles y babosas, simplifican el proceso gracias a que son hermafroditas: cada individuo puede producir óvulos y espermatozoides. Sin embargo, estos organismos son relativamente escasos.

Las plantas verdes y los hongos utilizan la misma maquinaria celular, pero poseen diferentes células especializadas. Tanto para los animales como para las plantas, la principal ventaja de un procedimiento tan complicado como la reproducción sexual está en la variación genética que con él se obtiene (pp. 70-73).



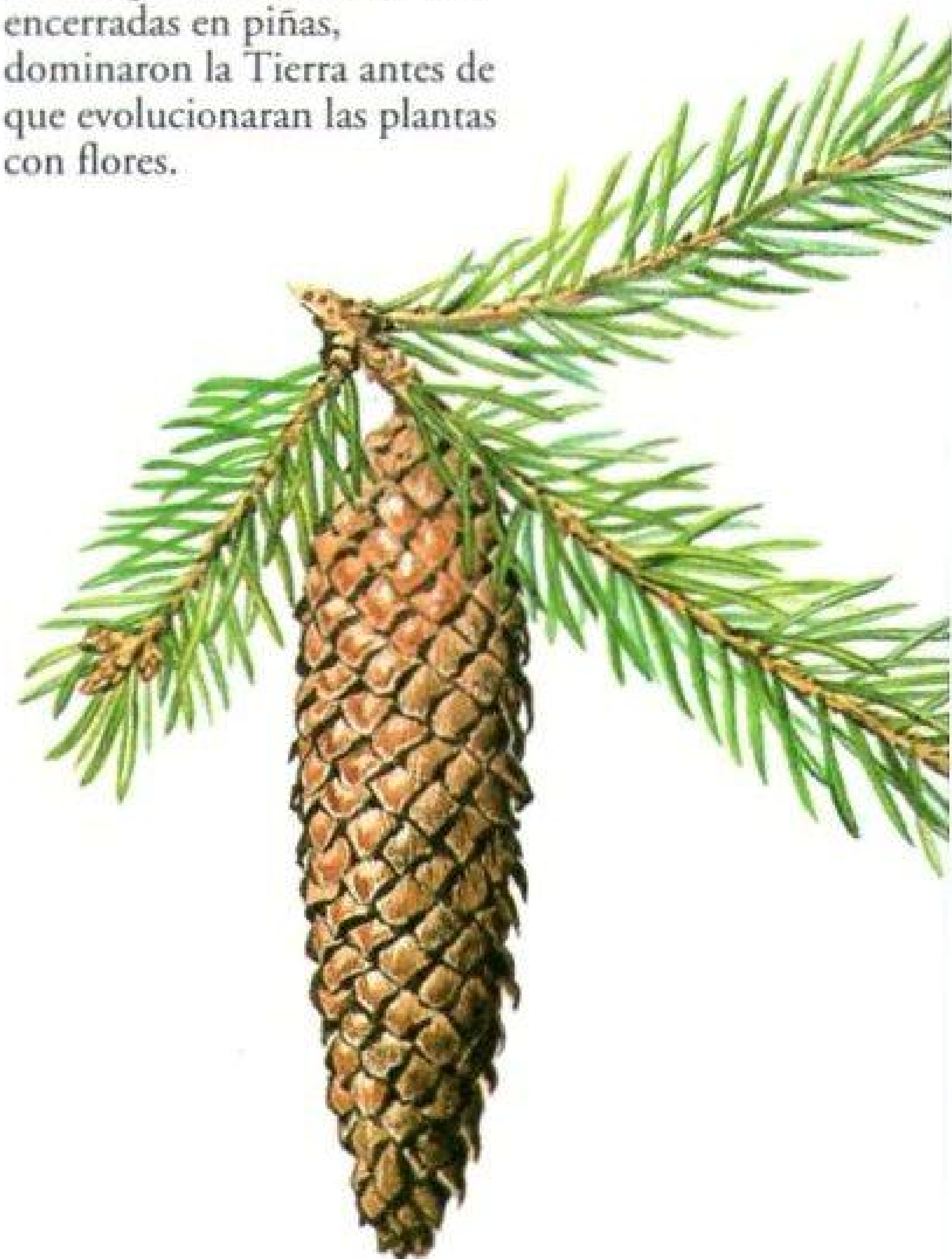
Los mamíferos, como el leopardo, han dominado la vida terrestre desde la desaparición de los dinosaurios a finales del Cretácico, hace 65 millones de años.



Este colimbo americano es una de las miles de aves que han evolucionado en la Tierra, colonizando hábitats terrestres, acuáticos y aéreos.

El otro método de reproducción es asexual. Los organismos unicelulares pueden escindirse en dos células hijas, genéticamente idénticas, cada una de las cuales es un nuevo organismo de la especie original. Muchas algas y protozoos —como las amebas, flagelados y ciliados— se multiplican de este modo. También se pueden reproducir asexualmente muchos organismos pluricelulares, entre ellos numerosas plantas, algas marinas, corales y gusanos. Parte del organismo se desprende y crece hasta convertirse en un nuevo individuo, genéticamente idéntico al organismo progenitor.

Para conseguir sobrevivir y reproducirse, un organismo tiene que mantenerse, mediante cuatro procesos vitales interrelacionados, que constituyen su maquinaria básica: crecimiento, nutrición, respiración y excreción. Para que un organismo crezca, se necesita nueva materia viva; es decir, más células. Este nuevo material no se puede sacar de la nada; los organismos tienen que producirlo adquiriendo materias primas del



Las gimnospermas como el abeto, que tienen las semillas encerradas en piñas, dominaron la Tierra antes de que evolucionaran las plantas con flores.



entorno y transformándolas en su propia materia viva. En esto consiste la nutrición.

Todos los seres vivos necesitan nutrirse, y también existen dos maneras principales de hacerlo. Las plantas verdes y las bacterias fotosintéticas y quimiosintéticas absorben moléculas inorgánicas del entorno —entre ellas, dióxido de carbono— y las transforman en moléculas orgánicas que pasan a formar parte de sus cuerpos.

Los animales, los hongos y muchos tipos de bacterias necesitan una alimentación más compleja, y para ello consumen los cuerpos —vivos o muertos— de otros organismos o partes de sus cuerpos ya descompuestas. Estos alimentos orgánicos se transforman a continuación en las moléculas orgánicas particulares del organismo que los consumió. Por ejemplo, una vaca come hierba; las proteínas de la hierba se descomponen en aminoácidos, que se utilizan para elaborar las proteínas del cuerpo de la vaca. A su vez, estas proteínas pueden ser devoradas y aprovechadas por otro animal.

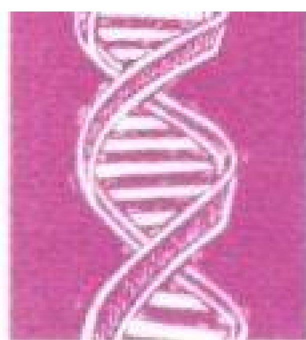
Para hacer funcionar el proceso de nutrición y otras partes de la maquinaria metabólica de un organismo se necesita una fuente de energía. En todos los organismos, esta fuente es un grupo de compuestos ricos en energía, el más común de los cuales es el adenosín-trifosfato o ATP. Mediante el proceso de respiración, todos los organismos elaboran ATP añadiendo un nuevo grupo fosfato al adenosín-difosfato (ADP).

La respiración de las plantas funciona en parte gracias a la energía solar, pero casi todos los demás organismos fabrican ATP utilizando la energía procedente de la descomposición de sustancias como los azúcares y las grasas en moléculas más sencillas. En las levaduras, esto se lleva a cabo en condiciones anaerobias, es decir, sin oxígeno. Pero casi todos los demás organismos, incluyendo los seres humanos, necesitan oxígeno para realizar la respiración aerobia, un método de descomposición de moléculas particularmente eficaz. En las células de casi todos los animales, por ejemplo, se utiliza oxígeno para oxidar la glucosa y generar ATP, dando como subproductos dióxido de carbono y agua.

En las actividades metabólicas del crecimiento, la nutrición y la respiración se producen numerosas sustancias que se pueden reciclar para seguir impulsando el crecimiento o la respiración. Pero también se producen desechos que no se pueden seguir utilizando. En los animales, estos productos de desecho —como la urea, el ácido úrico y el dióxido de carbono— se expulsan del cuerpo mediante los procesos de excreción. El dióxido de carbono se desprende con el aire exhalado, mientras que la urea, disuelta en agua, se excreta en forma de orina.

Para que un ser vivo pueda obtener los nutrientes que necesita —y también luz solar, oxígeno y pareja sexual cuando llega el momento— tiene que ser capaz de responder activamente a su ambiente: una planta crece hacia la luz para facilitar la fotosíntesis; un león necesita localizar a la gacela que le servirá de alimento; un gusano que vive en el fango tiene que

Las plantas con flores, o angiospermas, como estas amapolas californianas, forman el grupo más numeroso de plantas terrestres, y constituyen la base de la mayoría de los ecosistemas de tierra firme.



encontrar el ambiente aerobio que necesita, evitando el fango negro, que no contiene oxígeno. Y todos los organismos que se reproducen sexualmente tienen que encontrar parejas adecuadas, con las que unir sus células sexuales. Para lograr estos fines, los organismos utilizan sistemas sensoriales que les permiten recoger información acerca del estado de su medio ambiente inmediato: las condiciones de luz y calor, los sonidos, las sustancias químicas presentes y los contactos físicos. De esta manera, el organismo puede coordinar las respuestas adecuadas.

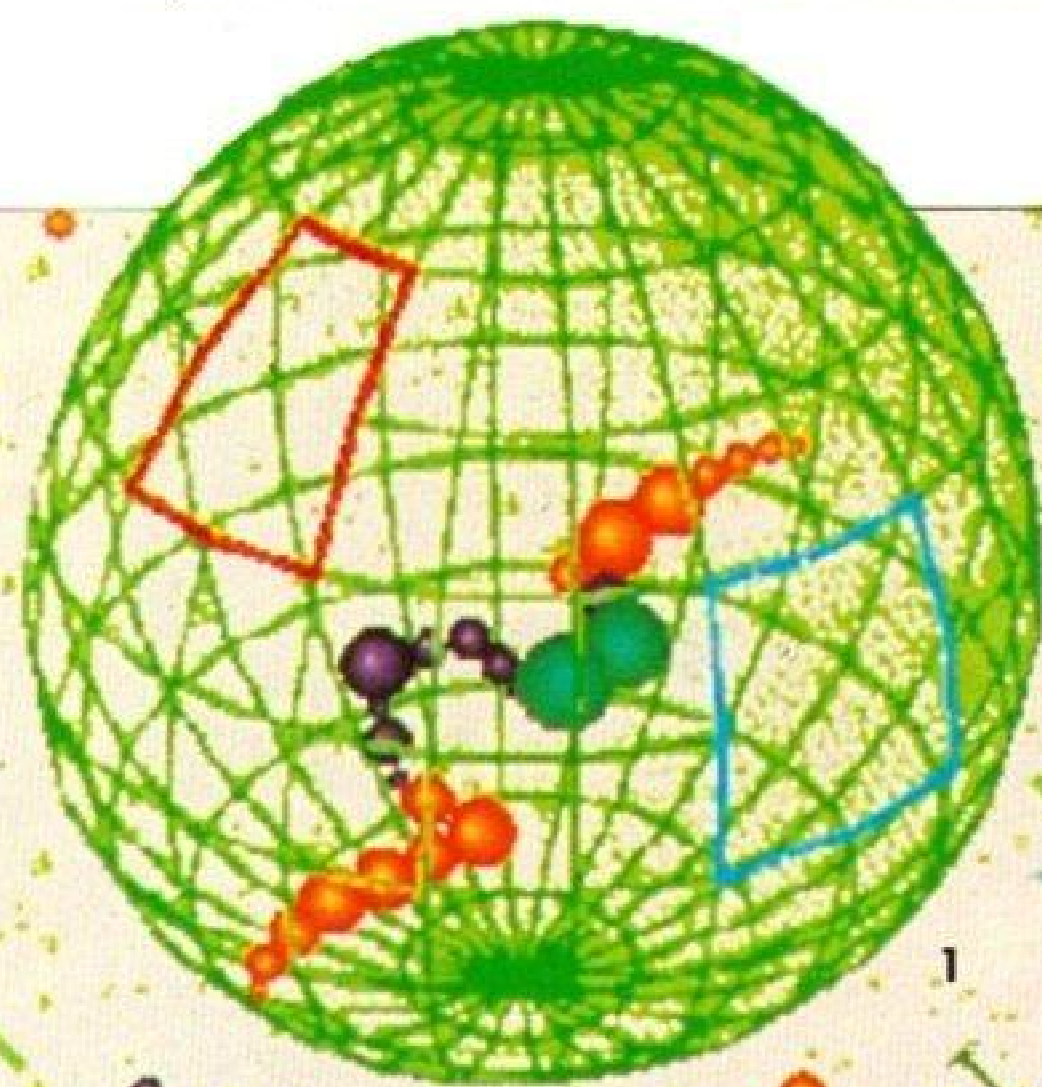
En numerosos organismos, una de estas respuestas es la locomoción: la capacidad de desplazarse nadando, arrastrándose, caminando o volando.

Estos siete «signos de vida» —la reproducción, el crecimiento, la nutrición, la respiración, la excreción, los sentidos y la locomoción— permiten distinguir fácilmente a casi todos los seres vivos de los objetos inanimados o sin vida. Pero existen algunas zonas conflictivas. Por ejemplo, es muy discutible que los virus respiren. Y aunque la mayoría de las plantas puede orientarse hacia la luz, no son capaces de desplazarse como hacen los animales. Sin embargo, tanto el virus del SIDA como una secuoya son seres vivos.

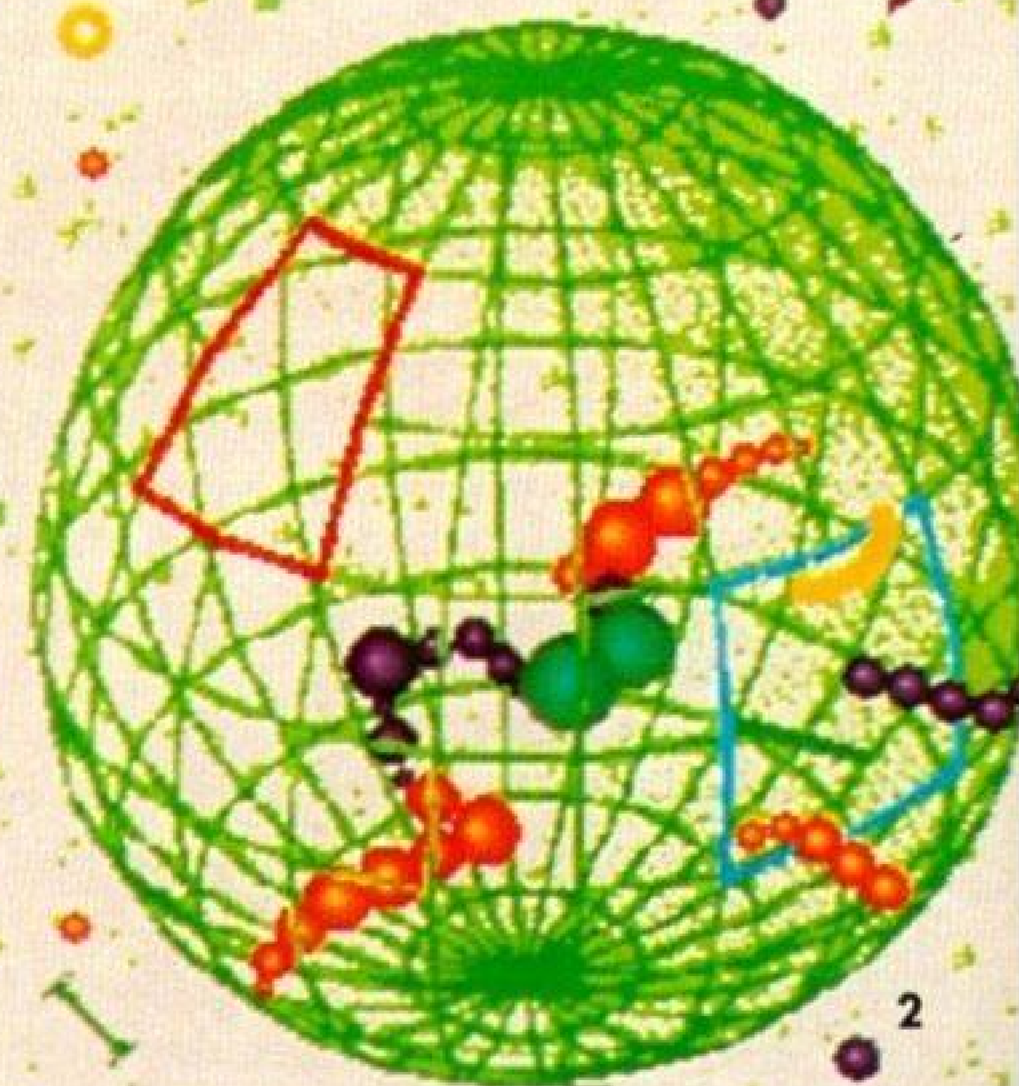
Estas consideraciones hacen necesaria una definición más fundamental de la vida que abarque todo lo que actualmente sabemos acerca de la base molecular de las formas vivientes. Esta definición, además, recalca la relación entre la vida y la evolución.

Los seres vivos poseen una facultad única: su propia estructura contiene un sistema de información que, si se le proporcionan las materias primas necesarias, es capaz de construir una nueva copia del organismo entero, incluyendo el sistema de información. Esta definición puede aplicarse incluso a formas de vida diferentes de las que conocemos en nuestro planeta y podría permitirnos reconocer las formas de vida que suponemos que se habrán desarrollado en otros planetas. Las principales interacciones que implica esta definición se resumen en los esquemas de estas páginas, inevitablemente influidos por nuestro conocimiento de la vida terrestre. Las entidades vivas están encerradas en membranas o receptáculos membranosos y su información está codificada en una secuencia lineal de subunidades moleculares. Estas dos características son indispensables para la vida en la Tierra, pero puede que no sean absolutamente necesarias en otros lugares. Los organismos originados en procesos evolutivos extraterrestres podrían tener diferentes maneras de comunicarse con su medio ambiente y su información podría almacenarse con un sistema distinto.

El sistema de información de un organismo tiene que ser amplio, para poder codificar toda la complicada maquinaria molecular que permite realizar copias de sí mismo. Este proceso incluye la copia del propio sistema de información, y aquí es donde se manifiesta la conexión entre la vida y la evo-



Receptáculo básico y almacén de información del «organismo».



Incorporación de nuevas moléculas del entorno al «organismo».

ESQUEMA BÁSICO DE LA VIDA

Todos los organismos vivos interaccionan con su ambiente de maneras muy parecidas. Estos esquemas no representan seres vivos reales, sino que ilustran los principios en que se basan dichas interacciones.

Este organismo básico consta de un receptáculo lleno de moléculas —la esfera verde—, que separa al ser vivo de su entorno inmediato.

En el receptáculo existen dos zonas especializadas. Una de ellas (la abertura azul) permite incorporar moléculas del exterior a la estructura del organismo: en esto consiste el proceso de nutrición. En la segunda zona (roja), se pueden fabricar nuevos componentes para construir una copia del organismo: el proceso de reproducción.

En el interior del receptáculo, la cadena multicolor representa el almacén de información del organismo. Dicho almacén debe poseer dos propiedades fundamentales: en primer lugar, debe ser capaz de hacer una copia fiel de sí mismo, de manera que cada nuevo organismo formado en el proceso de reproducción contenga su propia versión del sistema de información.

En segundo lugar, el sistema de información debe ser capaz de especificar la fabricación de las moléculas que componen el organismo y de dirigir el montaje de estos componentes para construir un nuevo organismo.

lución. En el mundo real resulta imposible cumplir una larga serie de instrucciones absolutamente precisas sin que se produzcan errores. Cuanto más larga sea la secuencia, más inevitables serán los errores.

Aunque los sistemas de información se copian con extraordinaria fidelidad, es inevitable que algún detalle salga mal, y estos errores constituyen la materia prima de la evolución. A consecuencia de un error de copia casual, puede surgir un organismo ligeramente diferente de su progenitor.

Si, por alguna razón, este organismo resulta más eficiente que sus predecesores, tendrá más oportunidades de sobrevivir, y las copias que haga de sí mismo, que heredarán la información ligeramente alterada, acabarán por predominar sobre las que siguen exactamente el modelo parental. La selección natural se encargará de ello.

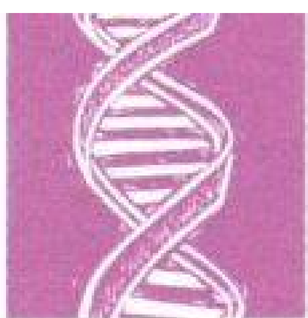


Aunque puedan parecer plantas, los corales son en realidad colonias de animales, que viven fijos al fondo marino, capturando partículas de alimento suspendidas en el agua.

El sistema interno de información se copia a sí mismo y dirige la construcción de un nuevo receptáculo.

Una copia del sistema de información pasa al nuevo receptáculo en fase de desarrollo.

Se ha formado una copia del organismo.



EL ORIGEN DE LA VIDA

Hace 4.000 millones de años no existía vida en la Tierra. El planeta estaba siendo bombardeado por enormes meteoros y no existían océanos. En tales condiciones, la vida resultaba imposible. Pero casi todos los expertos creen que hace 3.500 millones de años ya existían organismos celulares vivos. Y estos organismos debieron servir de alimento a sistemas capaces de autorreproducirse que todavía no se habían desarrollado hasta constituir células organizadas.

Las actuales moléculas autorreproductoras y portadoras de información —el ADN y el ARN— proporcionan algunas pistas acerca de las primitivas moléculas autorreproductoras. En los organismos actuales, la producción de copias del ADN y el ARN se logra con la ayuda de un arsenal de enzimas, todas las cuales son proteínas. Pero en un principio el sistema no era tan complicado. De los dos tipos de moléculas, probablemente fue el ARN (pp. 62-63) el que apareció antes. Una vez desarrollado el ARN —u otra molécula parecida—, la evolución posterior se encargaría de generar proteínas y ADN.

Pero ¿de dónde salió el ARN? Su molécula incluye bases orgánicas, azúcares y grupos fosfato, y parece demasiado complicada como para haber surgido de manera casual. En 1953, Stanley L. Miller, de la Universidad de Chicago, arrojó algo de luz sobre el modo en que pudieron formarse en la Tierra primitiva polímeros complejos como el ARN. Para ello, hizo pasar chispas eléctricas (que equivaldrían a los rayos u otras posibles fuentes de energía, como la luz ultravioleta) a través de una mezcla de gases, similar a la que se suponía que formaba la primitiva atmósfera terrestre: metano, amoniaco e hidrógeno. El océano primitivo estaba representado por agua en el fondo de un recipiente hermético.

A los pocos días, el agua empezó a colorearse a causa de un precipitado rojizo. Y se comprobó que este complicado caldo, formado por la acción de las chispas eléctricas sobre el vapor de agua y demás gases, contenía aminoácidos, las unidades estructurales con las que se construyen las proteínas.

Desde entonces se han llevado a cabo numerosos experimentos similares, pero utilizando una mezcla de gases diferente —vapor de agua, dióxido de carbono y nitrógeno—, que es la que ahora se cree que constituía la atmósfera primitiva. Y han seguido formándose aminoácidos. Pero, además, han aparecido las bases orgánicas de los nucleótidos que forman parte esencial del ARN y el ADN. Si estas bases, aminoácidos y otras moléculas orgánicas de pequeño tamaño pudieron formarse sin que las sintetizara ningún organismo vivo, lo más probable es que se fueran acumulando en los mares primitivos. En la actualidad, estas sustancias serían inmediatamente consumidas por los microorganismos, pero en aquellos tiempos no existía ningún microorganismo que las pudiera utilizar como nutrientes.

A continuación, las pequeñas moléculas orgánicas (monómeros) tuvieron que unirse para formar complicadas cadenas (polímeros), sin que existieran enzimas catalizadoras que aceleraran el proceso. Una de las muchas teorías que pretenden explicar este proceso sostiene que las reacciones no se desarrollaron en una solución líquida libre, sino que los monómeros fueron absorbidos y alineados en la superficie de algún material sólido —tal vez partículas de arcilla—, donde resultaría más fácil que los monómeros contiguos se enlazaran para formar compuestos de cadena corta, precursores del ARN. El alineamiento y el enlace resultaron posibles gracias a la ordenación cristalina de las cargas electrostáti-

En la atmósfera primitiva de la Tierra existían componentes inorgánicos básicos, con los que construir moléculas orgánicas: entre ellos, dióxido de carbono, nitrógeno y vapor de agua.

Las fuentes de energía, como el rayo y la radiación ultravioleta del Sol, transformaron la materia inorgánica en moléculas orgánicas sencillas, solubles en agua.

Las bases orgánicas se enlazaron, formando las primeras cadenas de ácidos nucleicos (probablemente, ARN). Este proceso debió resultar más fácil sobre superficies sólidas, como partículas de arcilla *(ver abajo)*.

cas en las superficies de las partículas de mineral.

Parece probable que algunas de las secuencias de polímeros precursores creadas al azar tuvieran una mínima capacidad catalítica para producir copias. Así pudo iniciarse una cierta selección natural: las secuencias que resultaran más eficaces para incorporar monómeros del entorno acuoso y utilizarlos para realizar copias de sí mismos se irían haciendo más numerosas.

En cierto momento del proceso debió tener lugar un avance trascendental: los complejos autorreproductores se encerraron en membranas, aislándose del agua que los rodeaba. Una de las principales ventajas de este cambio consistió en que las moléculas construidas no quedaban flotando, separándose unas de otras. Las células actuales están encerradas en membranas celulares compuestas por sustancias grasas, como los fosfolípidos. Es muy posible que las membranas de las primitivas entidades autorreproductoras estuvieran formadas por moléculas similares, dotadas de la capacidad de organizarse en láminas finas y formar minúsculas burbujas esféricas.

Cuando esto sucedió, aparecieron en la Tierra las primeras células. Ya existía vida reconocible como tal.

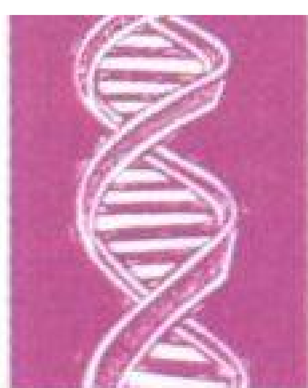


Las erupciones volcánicas desprendieron en la atmósfera dióxido de carbono, nitrógeno y vapor de agua, algunas de las sustancias inorgánicas con las que se pueden elaborar moléculas orgánicas.

Las primeras secuencias de ácido nucleico desarrollaron primero la capacidad de copiarse a sí mismas y después la de controlar la síntesis de proteínas.

El ARN, las proteínas y el ADN de doble cadena quedaron encerrados en minúsculos receptáculos formados por moléculas grasas. Se habían formado las primeras células.

El receptáculo —la membrana celular— permitía que las interacciones entre los ácidos nucleicos y las proteínas tuvieran lugar en un ambiente protegido, poco afectado por los cambios externos.



LAS LIMITACIONES DE LA VIDA

La existencia de todos los seres vivos de la Tierra se basa en la química del carbono. Pero ¿es ésta la única base química sobre la que puede surgir la vida, o es posible que existan otros modelos «extraterrestres» en otras partes del universo?

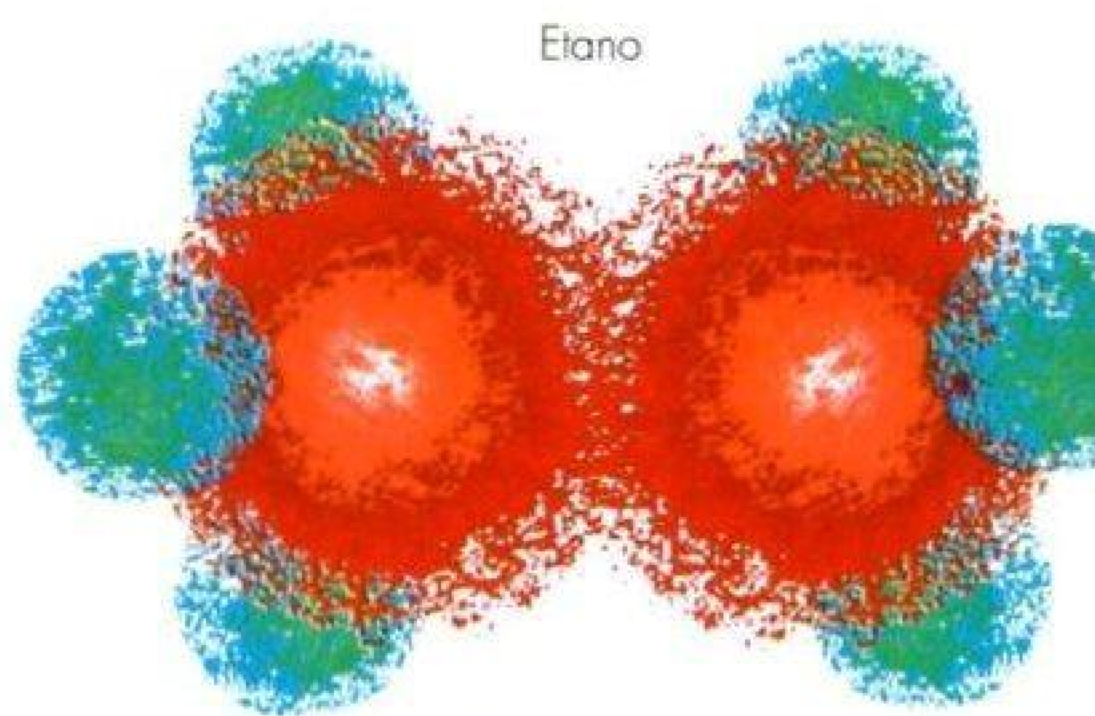
Casi todos los científicos están convencidos de que existe una química universal. Los átomos, núcleos atómicos, iones e isótopos que se pueden estudiar directamente en la Tierra, e indirectamente en las estrellas y otras estructuras del espacio exterior, proceden todos de la misma «caja de herramientas» atómica. La materia es la materia en todas partes; en todo el universo, las partículas subatómicas siguen las mismas pautas para combinarse y formar átomos. Igualmente conservadores son los métodos que siguen estos átomos para combinarse formando moléculas y reaccionar unos con otros. Así pues, el conocimiento de los átomos y moléculas terrestres debería constituir una base válida para considerar su comportamiento en otros lugares del universo.

La construcción de formas de vida —entidades que contienen un sistema de información que codifica la copia de toda la entidad, incluyendo el propio sistema de información (pp. 62-63)— está sometida a ciertas limitaciones atómicas y moleculares. En particular, los sistemas de información precisos y de cierto tamaño sólo se pueden elaborar con moléculas grandes, dotadas de una considerable capacidad para codificar las estructuras de otras moléculas. En los organismos de nuestro planeta, la información contenida en las moléculas de ADN codifica la estructura de moléculas más pequeñas de ARN: a su vez, la información contenida en el ARN codifica la estructura de las proteínas, que son las moléculas de las que depende el funcionamiento de la maquinaria del organismo.

El modo más económico de obtener la capacidad codificadora necesaria para construir una gran diversidad de componentes estructurales consiste en utilizar secuencias de unas pocas unidades relativamente pequeñas y bien caracterizadas. Cualquier otra estrategia molecular implicaría una variedad inmanejable de subunidades codificadoras, con la consiguiente complicación de la maquinaria necesaria para reconocer dichos componentes. Sin embargo, con un código basado en las secuencias resulta posible especificar la estructura de un número casi infinito de proteínas, utilizando tan sólo cuatro bases del ADN: estas bases nitrogenadas forman parte de los nucleótidos, componentes fundamentales del ADN (pp. 60-61).

En los seres vivos parece que el sistema de información está limitado a una o unas pocas moléculas de gran tamaño, compuestas por numerosas subunidades. En estas moléculas poliméricas, las distintas secuencias de cuatro subunidades pueden codificar un enorme número de productos finales.

La mayoría de los biólogos opina que este condicionamiento aparente pone un límite a los tipos de moléculas que podrían cumplir los requisitos de diseño. En la química conocida, sólo los compuestos de carbono parecen adaptarse al plan. Poseen una capacidad casi ilimitada para formar grandes polímeros, y su facilidad de combinación les permite construir todas las variedades necesarias de subunidades. Además, el carbono tiene una enorme capacidad para combinarse con otros elementos y formar moléculas complicadas, lo cual aumenta las posibilidades de variedad. El esqueleto de las moléculas orgánicas es una estructura de enlaces carbono-carbono, pero la facilidad con que el carbono se combina con el oxígeno, el hidrógeno, el nitrógeno, el azufre, el fósforo y otros elementos amplía extraordinariamente su repertorio de formación de moléculas.

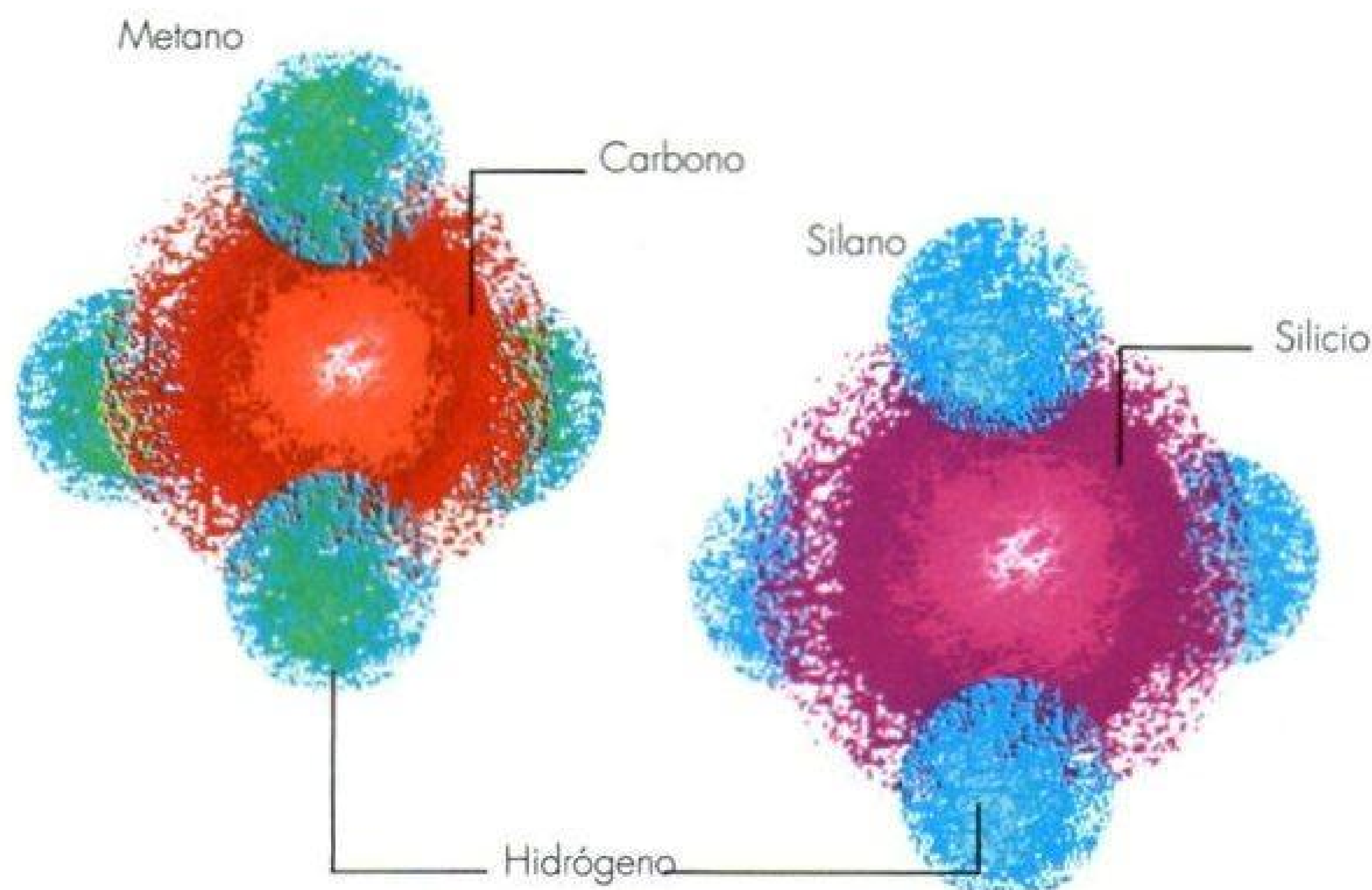


Los enlaces entre átomos dependen de los orbitales de los electrones. Los del carbono están dirigidos hacia las cuatro esquinas de un tetraedro imaginario, con el átomo de carbono en el centro. Esta disposición tridimensional permite que las moléculas orgánicas se extiendan y ramifiquen libremente en todas direcciones.

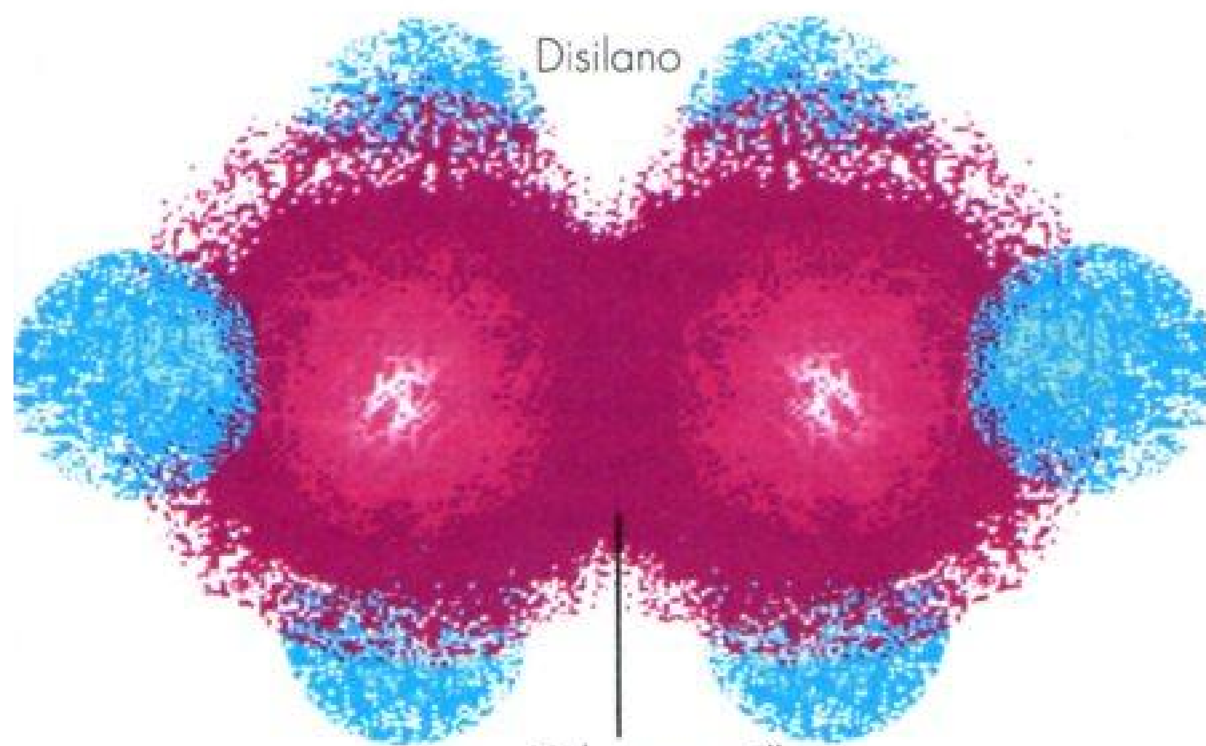
Se ha discutido e investigado mucho acerca de la posibilidad de que otros átomos con cuatro valencias (cuatro posibles enlaces), como el silicio, resulten tan versátiles como el carbono. Tal como indican los esquemas de estas páginas, el silicio puede formar unas cuantas moléculas orgánicas sencillas, pero en circunstancias normales —en el agua, y a temperatura y presión normales— es incapaz de formar las configuraciones más complejas de la familia del carbono.

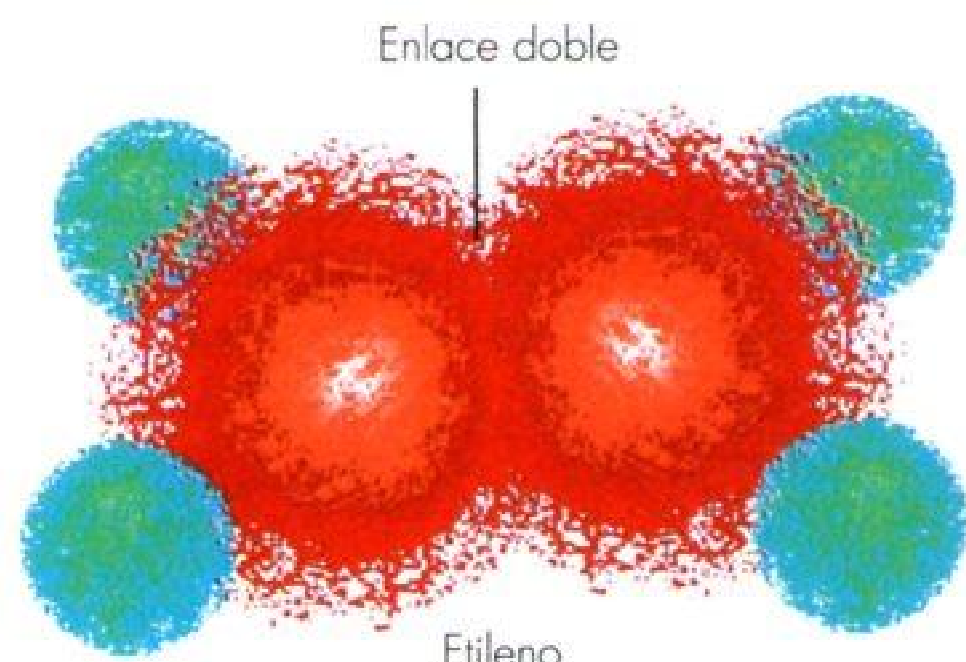
Al parecer, la vida en la Tierra tiene que limitarse al empleo de la química del carbono para construir la maquinaria de los seres vivos y su sistema de información. Las moléculas con la forma general del ADN, el ARN y las proteínas parecen fundamentales para la vida. Pero en un sistema de vida originado independientemente del nuestro, las subunidades del almacén de información y las moléculas que lo hacen funcionar podrían ser muy diferentes de como son en la Tierra.

El sistema de vida terrestre, basado en el carbono, también pone límites a las condiciones físicas en que pueden desarrollarse los procesos metabólicos de la vida. Para descomponer y reconstruir las moléculas de un modo controlado, traducir los códigos de información a moléculas funcionales y mantener inalterados los sistemas de información durante largos períodos de tiempo

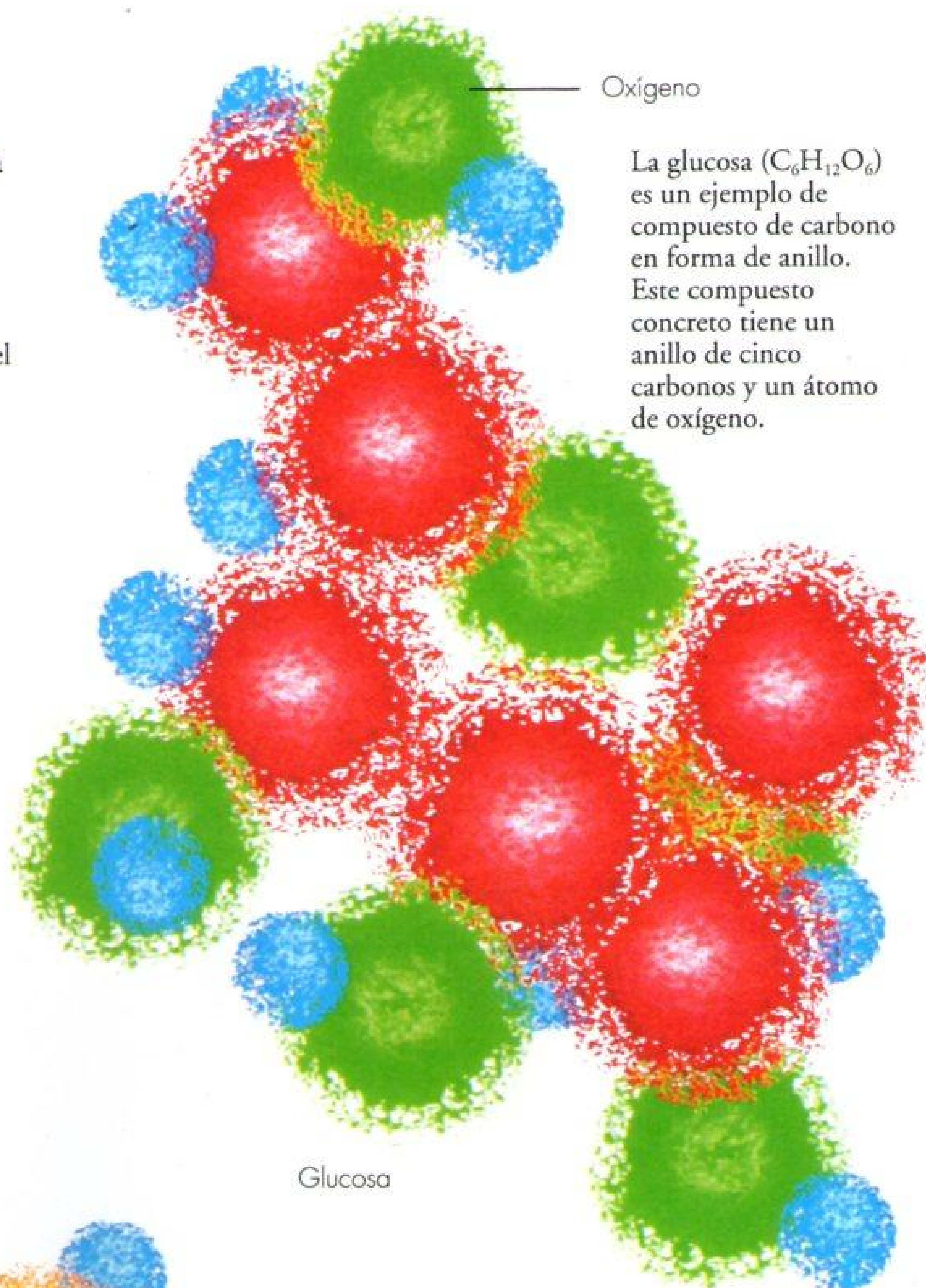


El metano (CH_4) es uno de los compuestos de carbono más sencillos. Consta de un solo átomo de carbono, rodeado por cuatro de hidrógeno. El silano (SiH_4) es un análogo exacto, formado por cuatro átomos de hidrógeno rodeando uno de silicio.





El etano (C_2H_6) consta de dos átomos de carbono unidos por enlaces simples. Su análogo silíceo es el disilano. El etileno (C_2H_4) se diferencia del etano en que sus dos átomos de carbono están unidos por un enlace doble.



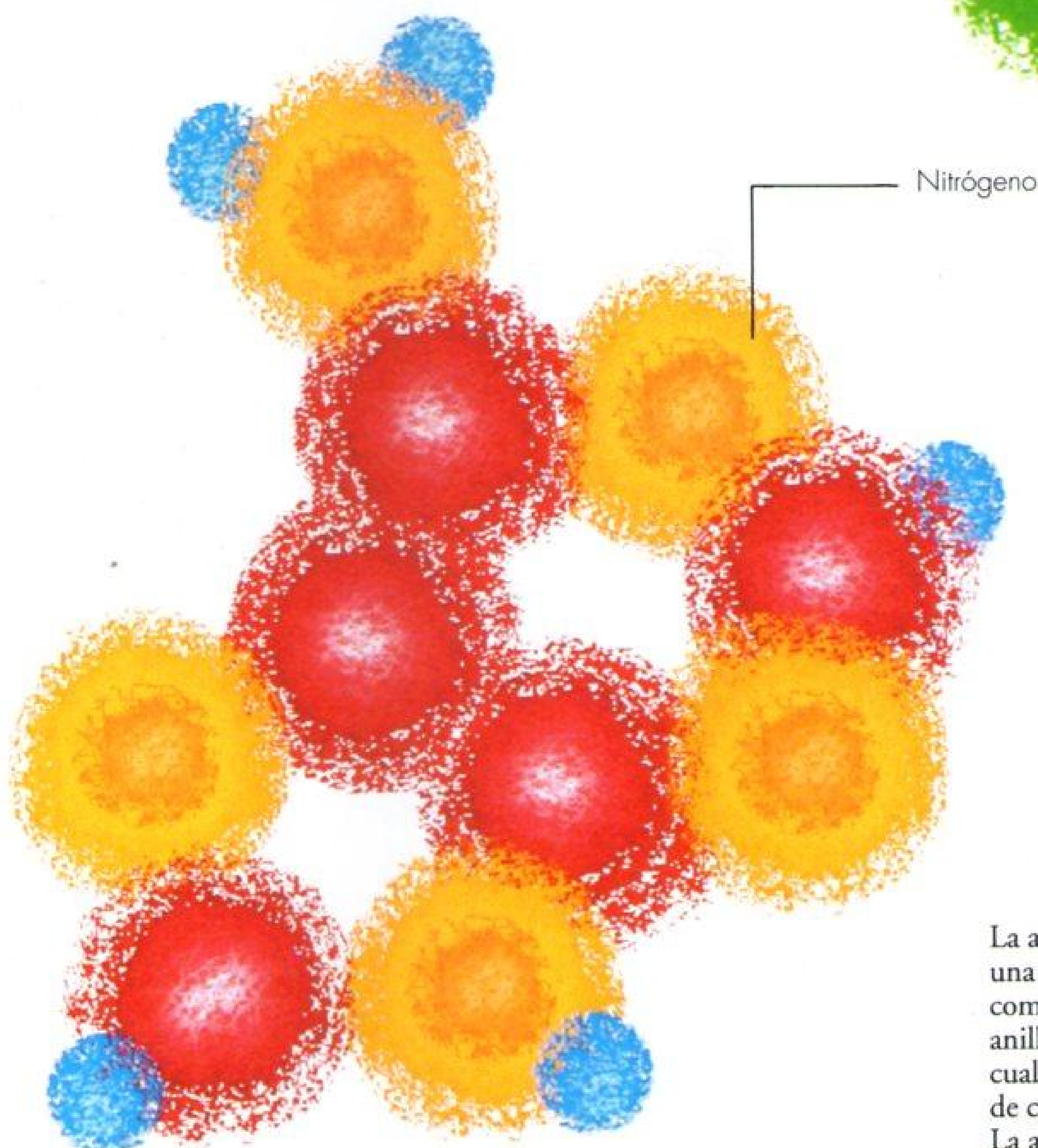
La glucosa ($C_6H_{12}O_6$) es un ejemplo de compuesto de carbono en forma de anillo. Este compuesto concreto tiene un anillo de cinco carbonos y un átomo de oxígeno.

son precisos dos requisitos: casi todas las moléculas deben encontrarse disueltas, y las condiciones de temperatura y presión no deben ser extremas. El agua es el único disolvente de uso general y lo bastante abundante para las moléculas orgánicas y para que se mantenga en forma líquida —y no en forma de hielo o vapor— debe encontrarse a temperaturas entre los 0 y los 100 grados centígrados.

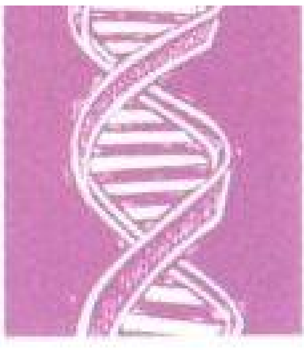
Así pues, parece que, dadas las condiciones químicas de este universo, la vida tiene que basarse en el carbono y el agua líquida, lo cual limita la cantidad de lugares del universo donde pueden desarrollarse la vida y la evolución.

La vida sólo puede surgir en planetas, satélites o asteroides cuya distancia de una estrella y condiciones atmosféricas determinen una gama de temperaturas de entre 0° y 100° C, al menos en algunas regiones, y cuya estructura física posea o pueda generar agua. Además, tiene que existir carbono. Si en un planeta se mantienen estas condiciones, es probable que, con el tiempo, se desarrollen en él formas vivas.

La validez de esta suposición sólo se podrá demostrar mediante exploraciones planetarias que, por el momento, están más allá de nuestras posibilidades técnicas. La Tierra, a diferencia de nuestros vecinos Venus y Marte, cumple los requisitos necesarios para el desarrollo de la vida. Pero si existe vida en otros planetas o satélites, en ésta o en otras galaxias, ¿qué formas puede haber adoptado después de 4.000 millones de años de evolución?



La adenina ($C_5N_5H_5$) es una molécula complicada, con dos anillos, cada uno de los cuales incluye átomos de carbono y nitrógeno. La adenina es uno de los componentes del ADN.



LAS UNIDADES MÁS PEQUEÑAS

Durante unos 3.000 millones de años, a lo largo de todo el Precámbrico, la evolución actuó en un mundo de organismos unicelulares. Cada una de estas células aisladas era un ser vivo individual, y todas las especies que se adaptaron a un nicho concreto en aquel mundo primitivo estaban formadas por poblaciones de células independientes. En la mayoría de los casos, la célula es la unidad más pequeña que puede considerarse «viva».

En realidad, una célula no es más que un paquete de moléculas de compuestos de carbono en solución acuosa, rodeado por una cubierta flexible, o membrana. En cualquier tipo de célula, la membrana sólo mide 10 nanómetros de espesor: si apiláramos diez mil membranas celulares, una sobre otra, la altura del montón resultante sería igual que el espesor de esta página. Esta delgadísima membrana está compuesta por una doble capa de moléculas grasas con carga eléctrica, llamadas fosfolípidos. Adheridas a las superficies externa e interna de la membrana hay proteínas que penetran en ella a través de poros que permiten que ciertas sustancias atraviesen la membrana.

Las primeras células viables que aparecieron en la Tierra eran muy parecidas a las de las actuales bacterias y algas verde-azuladas. Según indica el registro microfósil, aquellos organismos unicelulares procarióticos —algunos de los cuales podían agruparse, formando filamentos o láminas— fueron las formas de vida dominantes en este planeta durante la mayor parte del Precámbrico.

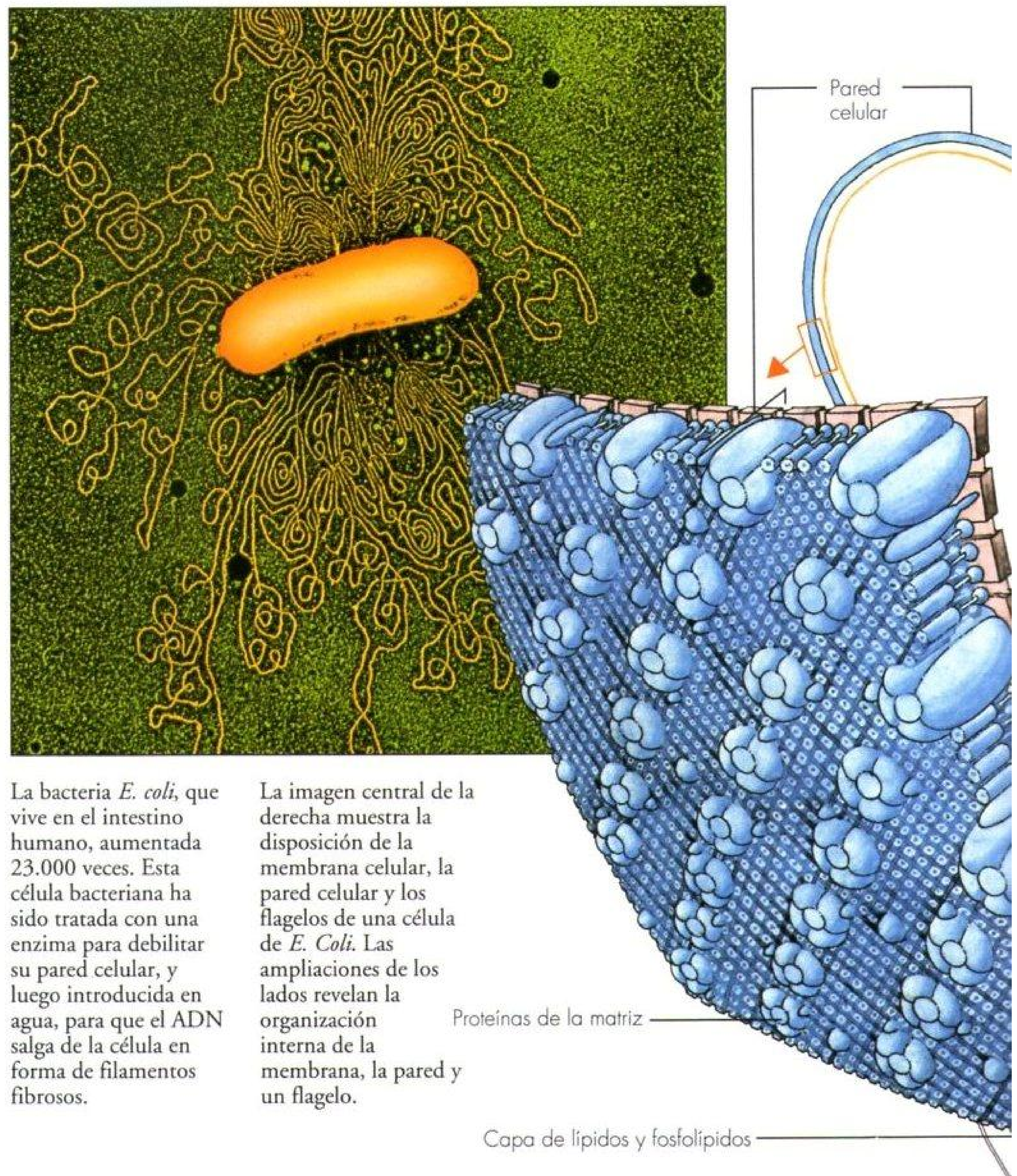
Las células procarióticas —como las de las bacterias— son tan diminutas que incluso vistas con un microscopio óptico no parecen más que minúsculos puntitos. Pero con un microscopio electrónico se aprecia que poseen una pared celular —una cubierta semirrígida que cubre la membrana celular— y que carecen de núcleo. Una célula bacteriana típica consta de un anillo de ADN de doble filamento, situado por lo general en el centro de la célula y rodeado por citoplasma que contiene miles de ribosomas, donde se fabrican las importantísimas proteínas.

Las procariontes actuales presentan una gran variedad de formas: desde minúsculas esferas o bastoncillos hasta largas hélices y cadenas de esferas. A pesar de la aparente sencillez de su estructura, la evolución las ha dotado de capacidades metabólicas muy diversas, que las convierten en destacados participantes en el flujo de energía y moléculas alrededor de nuestro planeta.

Como si se tratara de alquimistas bioquímicos, diferentes especies de procariontes pueden fotosintetizar como las plantas verdes, descomponer casi cualquier tipo de molécula orgánica para utilizarla como nutriente o fijar el nitrógeno gaseoso de la atmósfera. Hay bacterias capaces de generar metano, de adquirir oxígeno a partir de sulfatos, e hidrógeno a partir de ácido sulfhídrico, y de sobrevivir y prosperar en las condiciones más extremas de calor, frío o salinidad.

Los intentos de los taxonomistas por rastrear las líneas evolutivas que conectan a los distintos microorganismos, estructuralmente similares pero muy diversos metabólicamente, fracasaron hasta que se pudo examinar el ADN y el ARN de las células. Los resultados de la descodificación del material nuclear de los microorganismos han permitido establecer una clasificación de los procariontes y, lo que es más importante, descubrir un nuevo reino de seres vivos. Los trabajos realizados con el llamado «fragmento 16S» del ARN ribosómico de los procariontes revelaron que se podía clasificar a las bacterias en dos ramas evolutivas: las eubacterias y las arquibacterias.

Las eubacterias son las bacterias «normales», si es que se puede aplicar este término a unos organismos tan variados. En cambio, las arquibacterias están especializadas en la adaptación a las condiciones más extremas que puedan darse. Su bioquímica metabólica es diferente de la de las eubacterias, y también son diferentes sus paredes celulares, sus enzimas y sus métodos de fotosíntesis.



La bacteria *E. coli*, que vive en el intestino humano, aumentada 23.000 veces. Esta célula bacteriana ha sido tratada con una enzima para debilitar su pared celular, y luego introducida en agua, para que el ADN salga de la célula en forma de filamentos fibrosos.

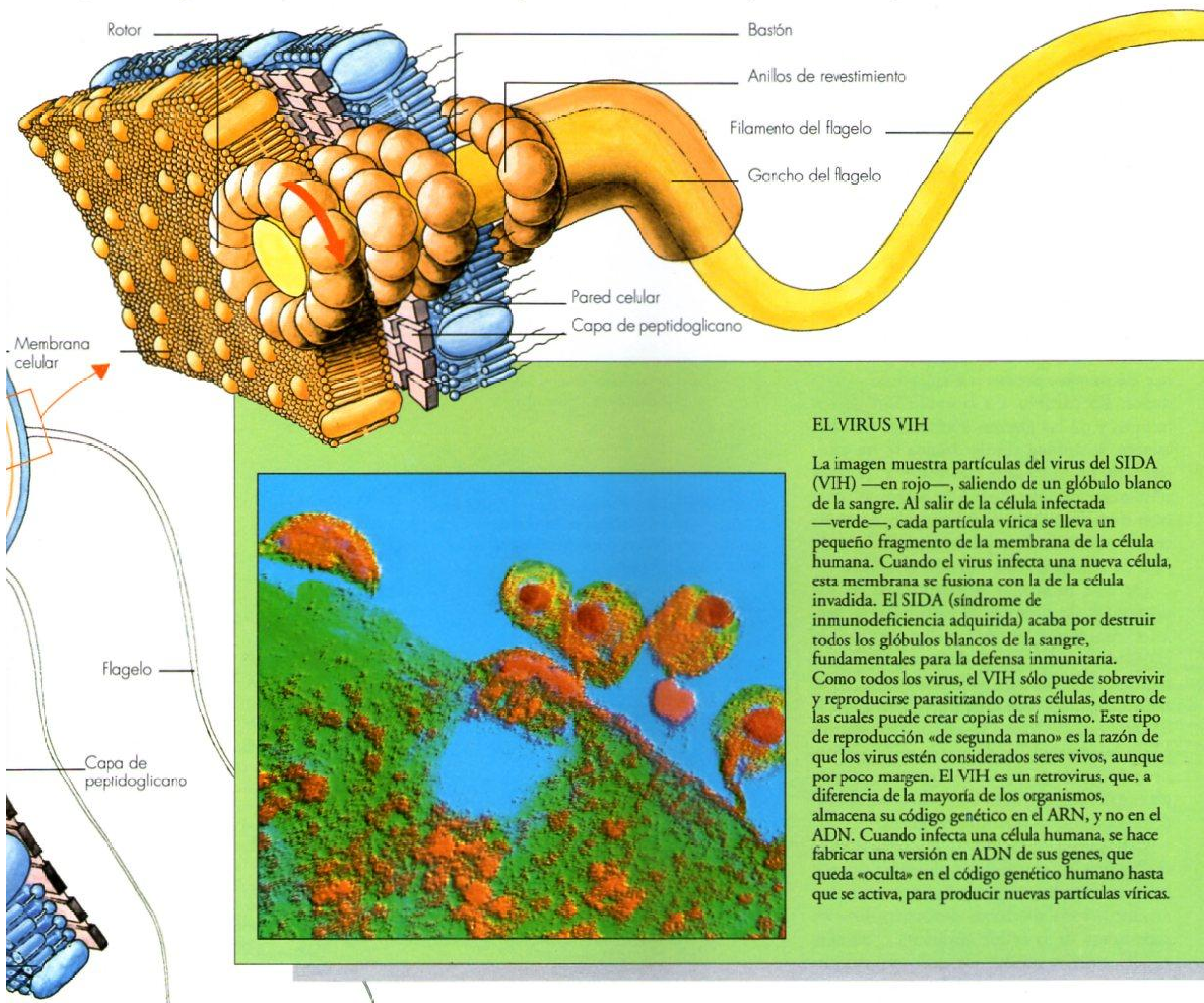
La imagen central de la derecha muestra la disposición de la membrana celular, la pared celular y los flagelos de una célula de *E. Coli*. Las ampliaciones de los lados revelan la organización interna de la membrana, la pared y un flagelo.

Algunas arquibacterias son anaerobios extremos, capaces de colonizar ambientes que carezcan por completo de oxígeno, y la más mínima cantidad de oxígeno resulta letal para ellas. Otras son capaces de metabolizar el azufre y sobreviven en ambientes sumamente calientes y ácidos. Las hay capaces de vivir en soluciones salinas superconcentradas, que matarían a cualquier otro ser viviente. No cabe duda de que las arquibacterias son formas vivas muy distintivas, que merecen su actual inclusión en un reino aparte.

Pero aún más distintivos son los virus, que ni siquiera son células y, por tanto, no encajan en ninguna clasificación de los seres vivos. Los virus son las entidades más pequeñas capaces de producir copias de sí mismas por medio del ADN o el ARN, y de este modo cumplen únicamente el requisito más básico para una definición molecular de la vida. Un virus consiste en un conjunto de genes envuelto en una cubierta de proteína o cápsida.

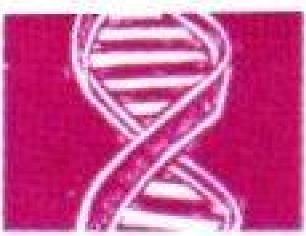
Los virus no pueden producir copias de sí mismos sin la ayuda de otras células, y sólo pueden sobrevivir como parásitos de células individuales. Por esta causa, pueden provocar enfermedades en animales y plantas. El virus del mosaico del tabaco parasitiza células vegetales; el VIH, responsable del SIDA, parasitiza células humanas; y los virus conocidos como bacteriófagos o *fagos* (pp. 188-91) infectan a las bacterias y las algas verde-azuladas.

El virus se fija a la superficie de la membrana de la célula huésped y hace pasar sus genes al interior. Allí los genes se duplican y generan además nuevas proteínas de la cápsida, formándose nuevos virus que, al salir de la célula, hacen que ésta se desintegre y muera. Una a una, van muriendo todas las células de un tejido concreto, con consecuencias patológicas para el organismo afectado. El virus del herpes, por ejemplo, provoca molestas calenturas, y el virus VIH infecta el sistema inmunológico humano, provocando el SIDA.



EL VIRUS VIH

La imagen muestra partículas del virus del SIDA (VIH) —en rojo—, saliendo de un glóbulo blanco de la sangre. Al salir de la célula infectada —verde—, cada partícula vírica se lleva un pequeño fragmento de la membrana de la célula humana. Cuando el virus infecta una nueva célula, esta membrana se fusiona con la de la célula invadida. El SIDA (síndrome de inmunodeficiencia adquirida) acaba por destruir todos los glóbulos blancos de la sangre, fundamentales para la defensa inmunitaria. Como todos los virus, el VIH sólo puede sobrevivir y reproducirse parasitizando otras células, dentro de las cuales puede crear copias de sí mismo. Este tipo de reproducción «de segunda mano» es la razón de que los virus estén considerados seres vivos, aunque por poco margen. El VIH es un retrovirus, que, a diferencia de la mayoría de los organismos, almacena su código genético en el ARN, y no en el ADN. Cuando infecta una célula humana, se hace fabricar una versión en ADN de sus genes, que queda «oculta» en el código genético humano hasta que se activa, para producir nuevas partículas víricas.



LA CÉLULA VIVA

La aparición de células eucarióticas más complejas, como las de los primeros protozoos que surgieron hace unos 1.500 millones de años, representó un paso decisivo en el curso de la evolución. En las células procarióticas, la membrana era una simple envoltura externa, pero ahora se desarrollaron membranas similares en el interior de la célula, lo cual permitió organizar su contenido en compartimentos y perfeccionar cada vez más las funciones celulares, como el procesamiento de la información contenida en el ADN, la síntesis de proteínas y la producción de ATP. Gracias a esto, las células de un organismo pueden diferenciarse y desarrollar funciones muy especializadas.

Se cree que esta complejidad interna de las nuevas células eucarióticas fue el resultado de una simbiosis o unión entre diferentes tipos de células procarióticas: una simbiosis íntima, ya que una de las células pasó a vivir en el interior de la otra.

El citoplasma de una célula procariótica es una suspensión de ribosomas relativamente sencilla. En cambio, una célula eucariótica posee varios tipos de orgánulos o porciones especializadas del citoplasma, que funcionan como «órganos subcelulares».

Las células eucarióticas de las algas y protozoos unicelulares pueden vivir como organismos independientes porque su dotación de orgánulos es capaz de mantener de manera autónoma todas sus actividades. En cambio, en la evolución de los hongos y de las plantas y animales pluricelulares, la unidad celular básica se ha diferenciado en una gama casi infinita de tipos celulares especializados. A lo largo del proceso evolutivo, esta diferenciación ha dado como resultado la especialización de cada tipo de células en una función diferente.

De este modo, la organización de los orgánulos de una célula muscular le permite contraerse, mientras que una célula glandular está organizada para fabricar y segregar una determinada sustancia, ya se trate de mucus o de una hormona. Dentro de cada especie, tanto las células musculares como las glandulares poseen la misma constitución genética. Sin embargo, sus diferentes organizaciones dependen de la actuación de dos conjuntos distintos de genes.

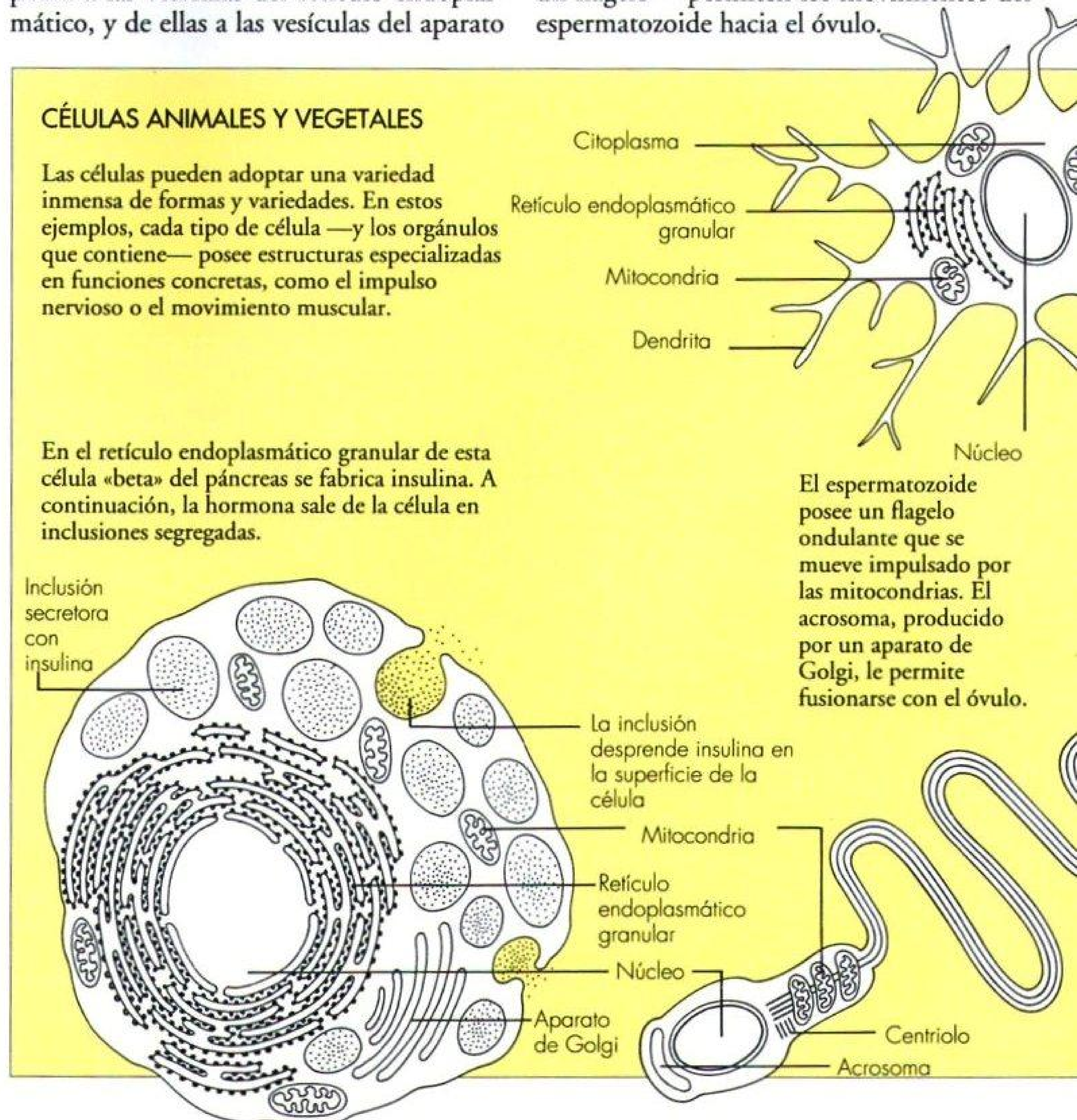
Las células eucarióticas pudieron desarrollar funciones muy especializadas porque las membranas les permitieron crear muchos tipos distintos de orgánulos. La membrana de la célula eucariótica, aunque es básicamente similar a la de los procariontes, tiene componentes moleculares nuevos, que le confieren una mayor flexibilidad en cuestión de movimiento y cambios de forma. En las plantas, la superficie externa de la membrana celular está cubierta por una pared celular, formada por celulosa.

Las mitocondrias son orgánulos con doble membrana; en la membrana interna se encuentra localizada la maquinaria enzimática encargada de la producción aerobia de ATP. También los cloroplastos de las células vegetales poseen una organización multimembranosa, y en sus membranas internas se encuentran la clorofila y las enzimas responsables de la fotosíntesis.

En las membranas se encuentran también los sistemas encargados de fabricar, modificar y segregar una enorme cantidad de proteínas. El retículo endoplasmático granular es un sistema de vesículas con dobles membranas, cuyas superficies exteriores están cubiertas de ribosomas. Las proteínas sintetizadas por los ribosomas pasan a las vesículas del retículo endoplasmático, y de ellas a las vesículas del aparato de Golgi, donde se unen con azúcares. Otros orgánulos membranosos son los lisosomas, que están llenos de enzimas digestivas y se encargan de descomponer los componentes citoplasmáticos innecesarios y los nutrientes absorbidos por la célula.

Hacia el centro del citoplasma celular hay otra formación más grande, también rodeada por una doble membrana: el núcleo. En su interior se encuentran los pares de cromosomas que contienen toda la información genética nuclear de la célula. Sólo las células eucarióticas tienen sus genes encerrados en un núcleo y repartidos en múltiples pares de cromosomas.

Otro avance evolutivo importantísimo fue el desarrollo de orgánulos filamentosos, conocidos como microfilamentos y microtúbulos, que hicieron posible el movimiento direccional. Estos orgánulos transportan materiales de un lado a otro de la célula, separan los pares de cromosomas durante la división celular y —formando un flagelo— permiten los movimientos del espermatozoide hacia el óvulo.



CÉLULAS ANIMALES Y VEGETALES

Las células pueden adoptar una variedad inmensa de formas y variedades. En estos ejemplos, cada tipo de célula —y los orgánulos que contiene— posee estructuras especializadas en funciones concretas, como el impulso nervioso o el movimiento muscular.

En el retículo endoplasmático granular de esta célula «beta» del páncreas se fabrica insulina. A continuación, la hormona sale de la célula en inclusiones segregadas.

El espermatozoide posee un flagelo ondulante que se mueve impulsado por las mitocondrias. El acrosoma, producido por un aparato de Golgi, le permite fusionarse con el óvulo.

Célula animal

Vesícula pinocítica

Mitocondria

Retículo endoplasmático liso

Membrana nuclear

Nucléolo

Cromatina (ADN nuclear)

Poro de la membrana nuclear

Centriolo

Membrana celular

Lisosoma

Retículo endoplasmático granular con ribosomas

Célula vegetal

Pared celular de celulosa

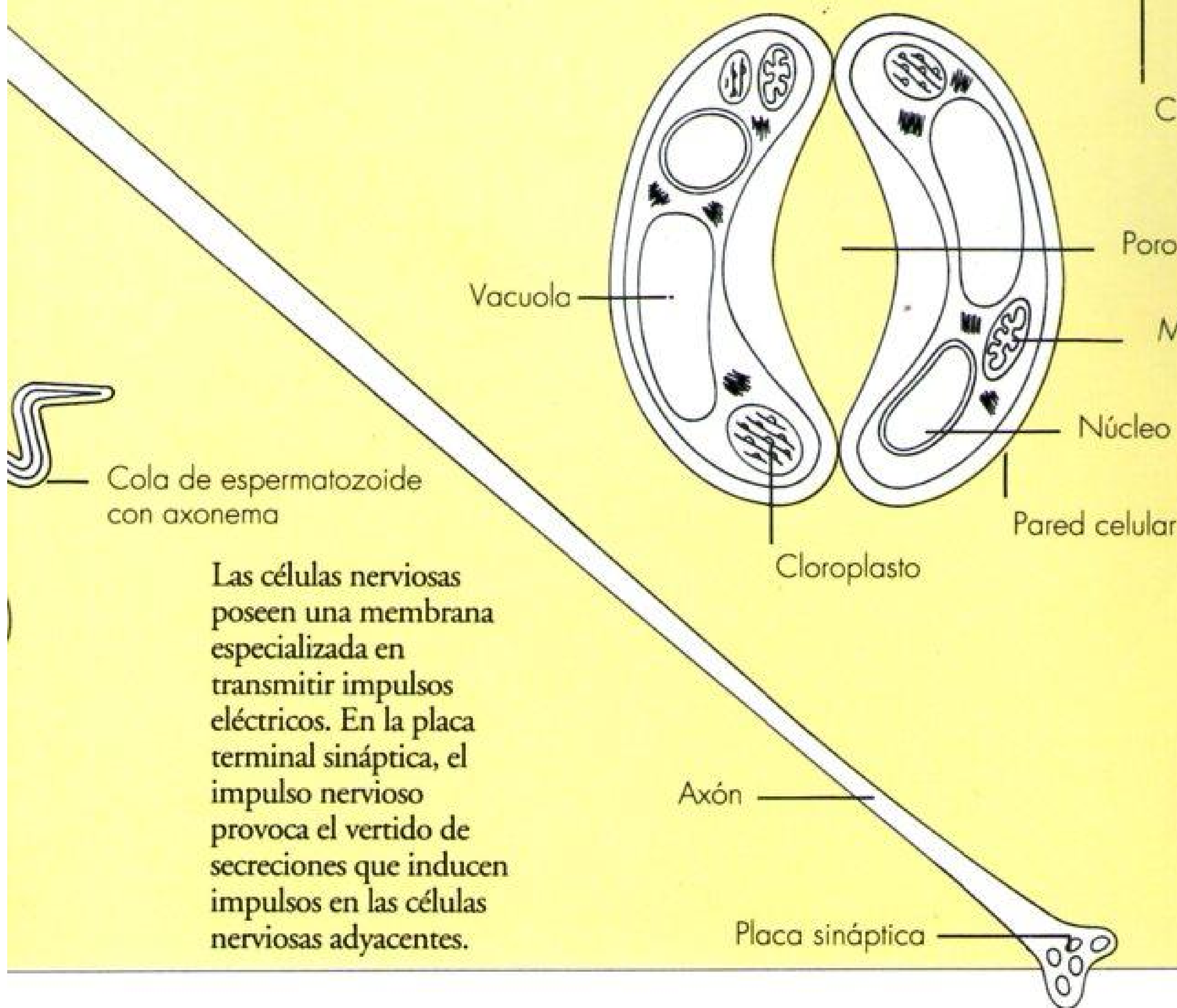
Vacuola

Citoplasma

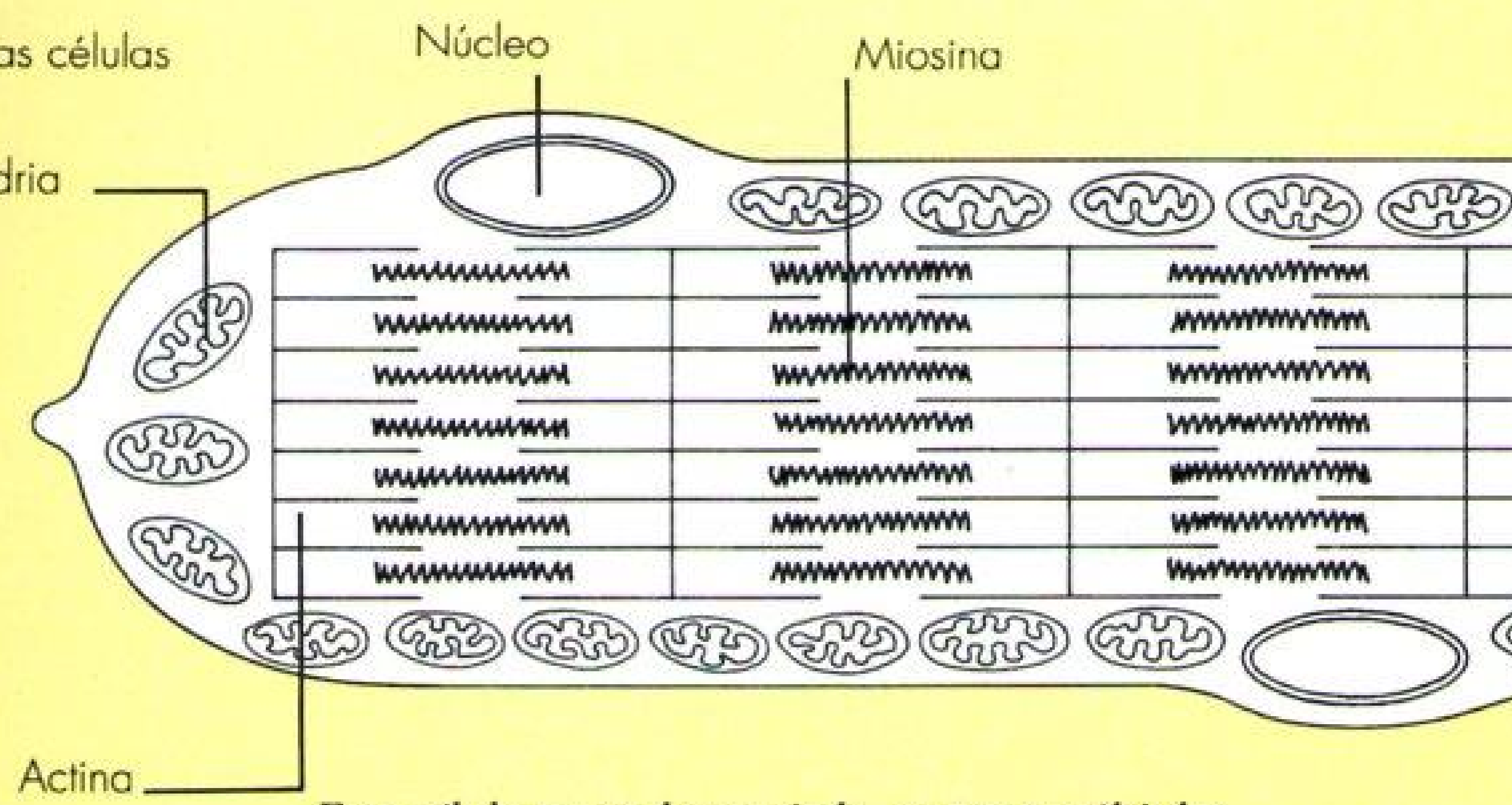
Cloroplasto

Esquema combinado de los orgánulos típicos de una célula animal (*arriba izquierda*) y de una célula vegetal (*abajo derecha*).

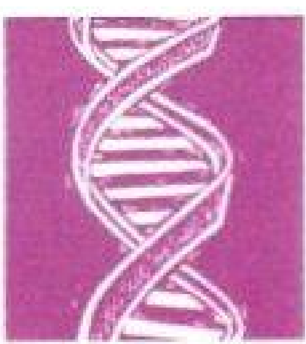
Cada poro de la parte inferior de una hoja está rodeado por dos células oclusivas. Los cambios en el contenido de agua de estas células abren y cierran el poro, regulando la pérdida de vapor de agua de la hoja.



Las células nerviosas poseen una membrana especializada en transmitir impulsos eléctricos. En la placa terminal sináptica, el impulso nervioso provoca el vertido de secreciones que inducen impulsos en las células nerviosas adyacentes.



Esta célula muscular estriada, con sus múltiples núcleos, se contrae cuando la energía generada en sus mitocondrias permite que las fibras paralelas de actina y miosina se deslicen unas sobre otras para producir movimientos.



ADN Y ARN

En 1859, la publicación de *El origen de las especies*, de Darwin, impulsó a muchos biólogos a investigar la manera en que se transmiten los caracteres de padres a hijos. Pero, sin enterarse de la conmoción provocada por el libro de Darwin, un monje moravio llamado Gregor Mendel experimentaba con guisantes en el huerto de su monasterio, y en 1865 publicó sus conclusiones acerca de la herencia de las variaciones.

Los trabajos de Mendel pasaron inadvertidos durante 35 años, hasta que unos estudiosos de la herencia y la cría selectiva los redescubrieron en una publicación poco conocida y se dieron cuenta de que Mendel había captado la esencia mecánica de la genética: la información se transmite de una generación a la siguiente en porciones diferenciadas. Mendel había percibido que estas unidades de la herencia, que más tarde recibirían el nombre de genes, se transmiten sin alteraciones de padres a hijos.

Los enlaces químicos que garantizan que los emparejamientos de bases sean los correctos se llaman puentes de hidrógeno, y conectan los medios peldaños de la «escalera» de ADN.

Para que la información genética se transfiera de una generación a otra y pueda desempeñar un papel en la evolución, se necesita algún tipo de sistema de copia. La capacidad de autocopiarse está implícita en la estructura molecular en doble hélice del ADN. Los dos filamentos helicoidales están conectados por las bases de los nucleótidos, que se enlazan por pares, cada base con una de la otra cadena, como medios peldaños en una escalera de caracol.

El emparejamiento de bases está gobernado por reglas estrictas: la adenina siempre se empareja con la timina, y la citosina con la guanina. Esta forma de emparejamiento significa que las dos cadenas son complementarias: si se separan, cada una puede reconstruir la mitad perdida, siguiendo las reglas de emparejamiento. Y así es como se fabrican en la célula nuevas copias del ADN.

Con unas pocas excepciones, la información genética se encuentra sólo en el núcleo de la célula. Para iniciar la producción de proteínas, el ADN transfiere su código a una «copia de trabajo» de sí mismo, llamada ARN mensajero (ARNm).

El ARNm se diferencia del ADN en tres aspectos: sólo tiene un filamento, su azúcar estructural es la ribosa, y en vez de timina tiene otra base, llamada uracilo. Después de haber sido transcrito, el ARNm sale del núcleo por los poros nucleares y pasa al citoplasma de la célula, para dirigir la síntesis de proteínas específicas en los ribosomas.

Antes de que se redescubrieran las conclusiones de Mendel, el citólogo alemán August Weismann había deducido que los genes se encontraban localizados en los núcleos de todas las células de un organismo vivo, y se había sentido impresionado por la situación privilegiada de estos genes, en especial los contenidos en los gametos (óvulos y espermatozoides).

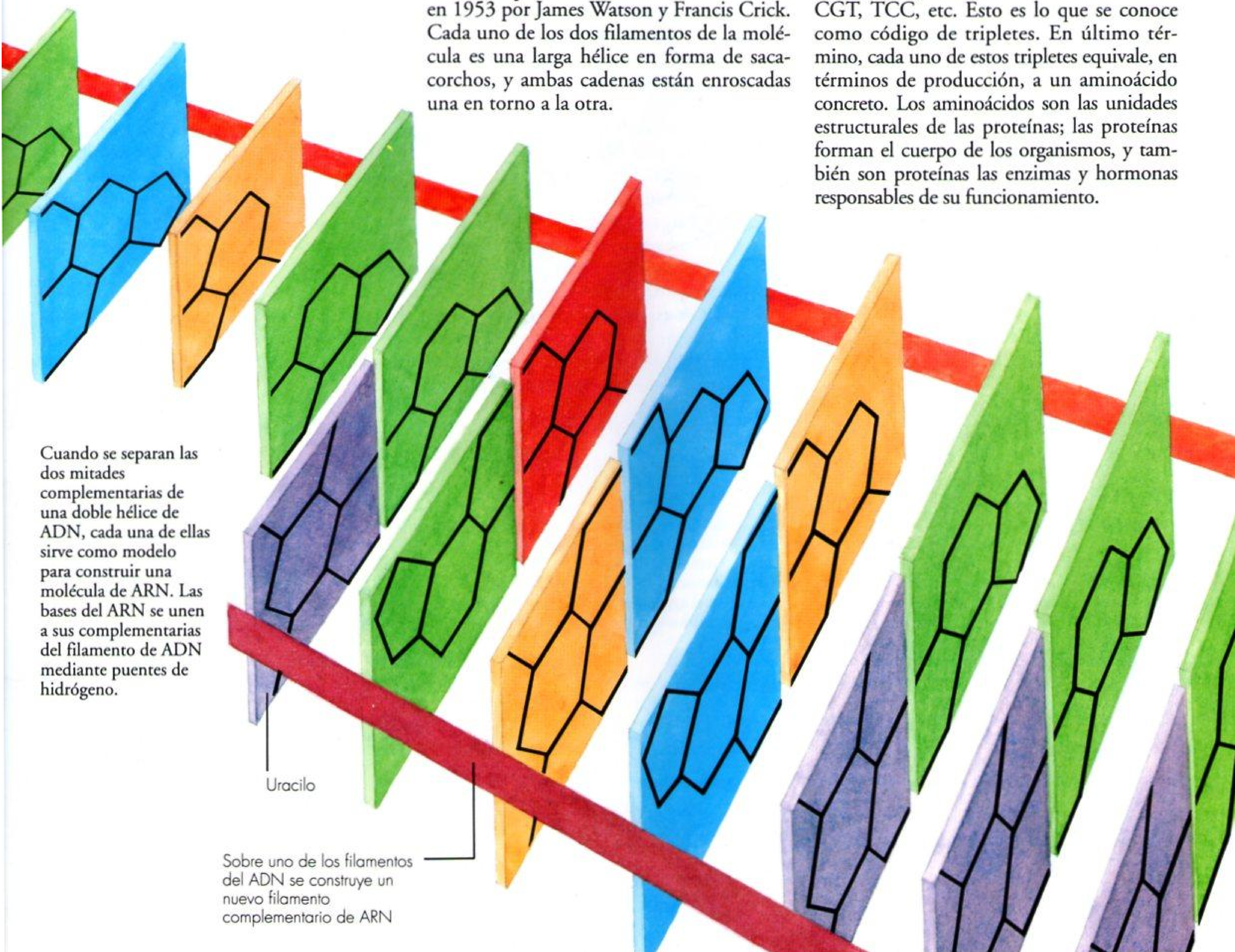
Los gametos son las únicas células que tienen ocasión de transmitir información genética de una generación a la siguiente, por medio de la reproducción sexual. Cuando se unen dos gametos —uno masculino y otro femenino— se forma la primera célula de un nuevo organismo. Weismann advirtió que los genes que importaban eran los de las células de la «línea germinal», que culmina con la producción de gametos. Los genes de las células del resto del cuerpo —el soma— están destinados a morir con las células que los contienen, pero los genes de los gametos se transmiten a la siguiente generación. El principal mérito de Weismann consistió en darse cuenta de que lo que se transmite de una generación a otra es información: información genética.

Gracias a los adelantos de la biología molecular moderna, los descubrimientos de Mendel y Weismann se pueden expresar ahora en términos de mecánica molecular. Los genes poseen una realidad física: están compuestos por moléculas de ADN. Y la información que se transmite de una generación a otra está contenida en la disposición estructural de estas moléculas de ADN.

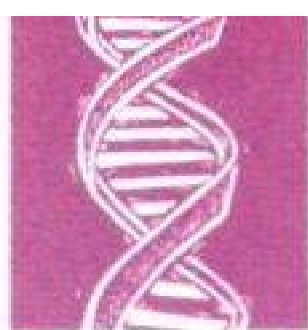
El ADN, o ácido desoxirribonucleico, es una molécula de doble cadena extraordinariamente larga, con una organización única: la famosa doble hélice, descubierta en 1953 por James Watson y Francis Crick. Cada uno de los dos filamentos de la molécula es una larga hélice en forma de sacacorchos, y ambas cadenas están enroscadas una en torno a la otra.

Las conexiones entre las dos hélices constituyen el factor fundamental para que el ADN pueda actuar como transmisor de información. Para comprender estas conexiones es preciso desentrañar la estructura del ADN. Cada filamento consta de una cadena fundamental, formada por subunidades llamadas nucleótidos, en los que alternan moléculas de azúcar (desoxirribosa) y fosfato. Unida a cada molécula de azúcar hay una base nitrogenada. En todos los incontables trillones de moléculas de ADN que existen en los organismos del mundo hay sólo cuatro tipos de bases nitrogenadas que forman los nucleótidos: adenina (A), timina (T), citosina (C) y guanina (G). Los nucleótidos A, T, C y G son como las letras de un alfabeto genético, con el que se ha elaborado un lenguaje para la información genética.

Este lenguaje está formado exclusivamente por palabras de tres letras: AAA, CGT, TCC, etc. Esto es lo que se conoce como código de tripletes. En último término, cada uno de estos tripletes equivale, en términos de producción, a un aminoácido concreto. Los aminoácidos son las unidades estructurales de las proteínas; las proteínas forman el cuerpo de los organismos, y también son proteínas las enzimas y hormonas responsables de su funcionamiento.



Cuando se separan las dos mitades complementarias de una doble hélice de ADN, cada una de ellas sirve como modelo para construir una molécula de ARN. Las bases del ARN se unen a sus complementarias del filamento de ADN mediante puentes de hidrógeno.



ADN Y ARN /2

La suma total de los genes contenidos en un núcleo celular representa un extraordinario almacén de información. En casi todos los organismos complejos, este almacén, conocido como genoma, contiene muchos millones de nucleótidos, dispuestos en un orden preciso. Esta ordenación, que constituye una descripción completa en lenguaje genético, es idéntica en todos los núcleos de cada individuo. Y esta descripción es lo que nos convierte a cada uno de nosotros en un ser único.

La descripción está expresada en un idioma que se basa en el código genético. Mediante secuencias de las cuatro bases del ADN —adenina (A), timina (T), citosina (C) y guanina (G)— se pueden componer exactamente 64 «palabras» de tres letras, como AAA, ATT, AGC, etc. El significado de estas 64 palabras es casi siempre el mismo en todo el mundo viviente.

Estas palabras forman códigos que se transcriben al ARN y se traducen en proteínas. Cada código, o gen, se traduce en una proteína. Dicha proteína desempeña una función concreta en la célula o el organismo: puede formar parte de la membrana, o ser una hormona, o una de las muchas enzimas que catalizan las reacciones bioquímicas en el interior de la célula.

Tres de las 64 palabras posibles se utilizan como señales de «parada», para indicar que allí concluye el código de una proteína. Las demás codifican los 20 aminoácidos que componen las proteínas. Un mismo aminoácido puede estar codificado por más de una palabra; en algunos casos, hasta por seis.

Por término medio, una proteína normal consta de una secuencia precisa de varios cientos de aminoácidos. Como cada aminoácido está codificado por una secuencia de tres bases, para codificar una proteína se necesita una secuencia de mil o dos mil bases del ADN. De la precisión en la secuencia de bases depende la precisión en la secuencia de aminoácidos. Lo más curioso es que, al parecer, sólo una pequeña fracción del ADN nuclear se utiliza en la codificación de proteínas. Probablemente, los genes restantes contribuyen a regular el funcionamiento del sistema de información del ADN, o bien sólo actúan durante el desarrollo fetal. Incluso es posible que carezcan de función en sentido corriente.

Entre el ADN de un gen estructural (que codifica una proteína concreta) y la síntesis de dicha proteína en los ribosomas media una cadena invariable de acontecimientos. En primer lugar, el gen de la proteína debe «activarse» para transcribir un ARNm utilizando como modelo la secuencia del gen.

En los eucariontes, los genes estructurales presentan una característica notable: entre los tripletes que codifican los aminoácidos hay secuencias intercaladas, a veces muy largas, que no codifican nada. Estas regiones «espaciadoras» del ADN se llaman intrones, y las regiones codificadoras que separan se llaman exones. Cuando se transcribe todo un gen estructural al ARNm, las secciones correspondientes a los intrones son eliminadas por enzimas antes de que el ARNm salga al citoplasma para ser traducido a una secuencia de aminoácidos.

Una vez realizada la copia en ARNm de un gen estructural (menos los intrones), el ARNm sale del núcleo por los poros de la membrana nuclear. El esquema grande de la derecha indica el modo en que se lleva a cabo la traducción del ARNm sobre la superficie de los ribosomas del citoplasma.

Los ribosomas son orgánulos diminutos, de unos 25 nanómetros de diámetro, compuestos por otro tipo de ARN, el ARN ribosómico, y numerosas enzimas. El ribosoma es una máquina de traducir, que va leyendo por orden las secuencias del código de tripletes de la molécula de ARNm, y utiliza cada triplete para especificar el aminoácido correspondiente en una cadena proteica que se va formando.

Otro agente fundamental en este proceso es otra variedad del ARN, el ARN de transferencia o ARNt; en realidad, los ARNt forman toda una familia de moléculas, cada una de las cuales puede traducir físicamente un codón —una «palabra» de tres letras— al aminoácido que representa. Para llevar esto a cabo, el ARNt tiene en uno de sus extremos un anticodón, o triplete de bases que se empareja con el codón. En el otro extremo se agrega el aminoácido codificado por el codón.

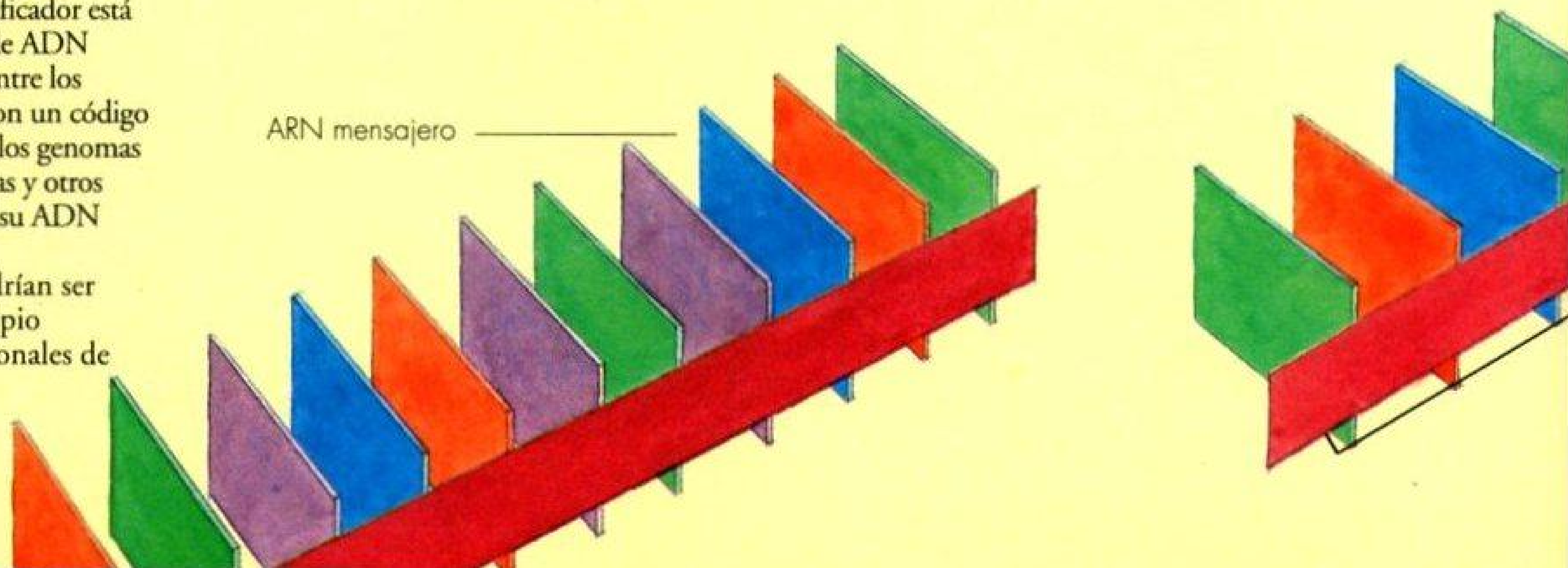
De este modo, con los ARNt como instrumento de empalme, los ribosomas pueden traducir una secuencia de tripletes de un ARNm a una secuencia de aminoácidos.

INTRONES

En muchos organismos, una cantidad sorprendentemente grande del ADN no parece intervenir activamente en la codificación de proteínas. Esta proporción varía según las especies: por ejemplo, es del 9 al 27 por 100 en los seres humanos, del 75 por 100 en los nematodos, del 67 por 100 en las moscas de la fruta y del 99 por 100 en los peces pulmonados. Parte de este ADN no codificador está formado por intrones. Estos segmentos de ADN parecen actuar como «acolchamientos» entre los exones, que son las porciones de ADN con un código funcional. Los intrones sólo aparecen en los genomas de los organismos complejos. Las bacterias y otros procariontes carecen de ellos, y casi todo su ADN codifica proteínas.

Se ha argumentado que los exones podrían ser antiguos «minigenes» que en un principio codificaban pequeñas secuencias funcionales de aminoácidos. Según esta hipótesis, las proteínas modernas habrían surgido por agregación de varias de estas secuencias de aminoácidos, y los intrones formarían parte de un mecanismo encargado del agrupamiento de los minigenes para formar agregados más grandes.

Cuando se produce ARNm a partir de un gen del ADN, se forman automáticamente en dicho ARN las versiones correspondientes de los intrones, pero para que el ARNm se pueda utilizar en la síntesis de proteínas es preciso eliminar antes los intrones y empalmar los exones en la secuencia correcta.



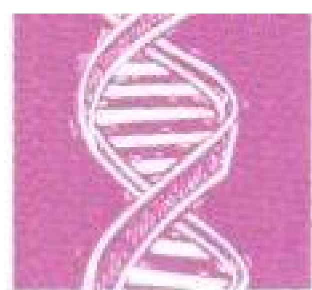
Esquema hipotético del proceso de interpretación del código del ARNm para construir una proteína concreta.
Las moléculas de ARN de transferencia (ARNt) son intermediarios cruciales en el proceso. Cada molécula de ARNt posee un código de tripletes (el anticodón) correspondiente a un aminoácido concreto, y se encarga de montar dicho aminoácido. El ARNt es el traductor del código genético, encargado de que cada triplete del ARNm dé lugar al aminoácido correcto en la proteína correspondiente. Todos estos procesos ocurren en la superficie del ribosoma, controlados por grupos de enzimas (ilustradas como manchas de color).

1 Este ARN de transferencia (ARNt) está ya conectado con su aminoácido específico. El ARNt posee un triplete de bases (anticodón) que se puede unir con el triplete que codifica su aminoácido en el ARN mensajero (ARNm). Existen diferentes ARNt para cada uno de los 20 aminoácidos.

2 El anticodón del ARNt se une al triplete correspondiente del ARNm, en un punto de la superficie del ribosoma donde existen enzimas que activan esta unión.

3 En el siguiente paso existe la posibilidad de que el ARNm se mueva a un centro enzimático diferente. Este proceso pondría a prueba la estabilidad y precisión de la unión del anticodón, y constituiría un eficaz mecanismo de seguridad para garantizar que se forman las secuencias de aminoácidos correctas (si la unión es incorrecta, el ARNt se separará del ARNm).

4 A continuación, el ARNt cede su aminoácido a la cadena proteica que se va formando en la superficie del ribosoma.



LA DOTACIÓN GENÉTICA

La manera en que se organiza en el núcleo de la célula la enorme cantidad de información genética contenida en él tiene profundas implicaciones en el proceso evolutivo. El ADN debe estar empaquetado de un modo eficaz, no sólo para que resulte accesible para sintetizar ARNm y así poder llevar a cabo la síntesis de proteínas, sino también para que pueda efectuar la autorreplicación antes de la división celular y de la formación de células sexuales.

Aunque sólo mide unas milésimas de milímetro, el núcleo de una célula humana contiene unos 6.800 millones de nucleótidos con sus bases, formando cadenas de ADN que, si se estiraran en línea recta, medirían en total 3 metros de longitud. En los seres humanos, este ADN se encuentra repartido en 46 segmentos que se llaman cromosomas. De estos cromosomas, 23 proceden del espermatozoide del padre de cada individuo, y los otros 23 del óvulo materno fecundado por el espermatozoide. Por término medio, cada cromosoma contiene 130 millones de nucleótidos.

La inmensa longitud del ADN de los cromosomas ha evolucionado así para adaptarse al pequeño tamaño del núcleo. Cada cromosoma parece constar de una molécula de ADN asociada con proteínas y moléculas de ARN que contribuyen a su empaquetamiento y funcionamiento. Los cromosomas son lo bastante grandes para poderse ver con un microscopio óptico normal. De hecho, su nombre (que significa «cuerpo coloreado» en griego) se debe a que, por su elevado contenido de ADN, son fáciles de teñir durante la preparación para el microscopio. Su aspecto va variando durante las diferentes fases de actividad de la célula: cuando ésta no se está dividiendo y se está formando ARNm, los cromosomas se encuentran enmarañados y no se distinguen individualmente.

Sin embargo, durante la mitosis (ver recuadro) los cromosomas hacen copias de sí mismos y se reparten en dos grupos. Es entonces cuando se contraen, adoptando una forma cilíndrica semejante a una salchicha, y se pueden distinguir y contar, permitiendo determinar la dotación cromosómica de una especie. Se llama cariotipo a la cantidad y forma de los cromosomas propios de una especie. En un núcleo normal, los cromosomas se encuentran duplicados, y su número es el número diploide (2N); en los óvulos y espermatozoides sólo hay un conjunto de cromosomas, y se dice que sus núcleos son haploides (número de cromosomas = N).

Estos números varían considerablemente de unos organismos a otros. En los seres humanos, 2N = 46 y N = 23; en los chimpancés, 2N = 48. En el nematodo *Parascaris*, parásito del caballo, 2N = 2; en el cangrejo ermitaño *Eupagurus*, 2N = 254: y en algunos tipos de helechos, 2N = 500, e incluso más. No parece existir relación directa entre el número de cromosomas de un organismo y la complejidad de éste.

Dentro de una especie, cada cromosoma posee una forma característica, aunque sólo existen dos formas básicas (más las intermedias) que dependen de la posición del centrómero, una especie de punto de conexión para las fibras que hacen moverse a los cromosomas durante la mitosis. Los cromosomas acrocéntricos tienen el centrómero en un extremo; los metacéntricos lo tienen cerca del centro, y el cromosoma adopta forma de V cuando se desplaza.

En algunos grupos de organismos, el número de cromosomas es constante para todas las especies; por ejemplo, 2N = 36 en casi todas las serpientes y 2N = 26 en casi todas las libélulas. Sin embargo, en otros grupos pueden darse variaciones muy grandes, incluso entre subespecies de una misma especie. Un ejemplo extremo es el muntiac (*Muntiacus muntjac*), un ciervo asiático cuya subespecie china tiene un número diploide de 46, mientras que la subespecie india de Assam sólo tiene 6 cromosomas.

Acúmulos de histonas (proteínas)

Nucleosoma: unos 180 pares de bases enroscados en torno a un acúmulo de histonas

Tubo enroscado de nucleosomas enlazados

Esqueleto de desoxirribosa-fosfato de una de las cadenas de ADN

ADN de doble cadena en hélice.

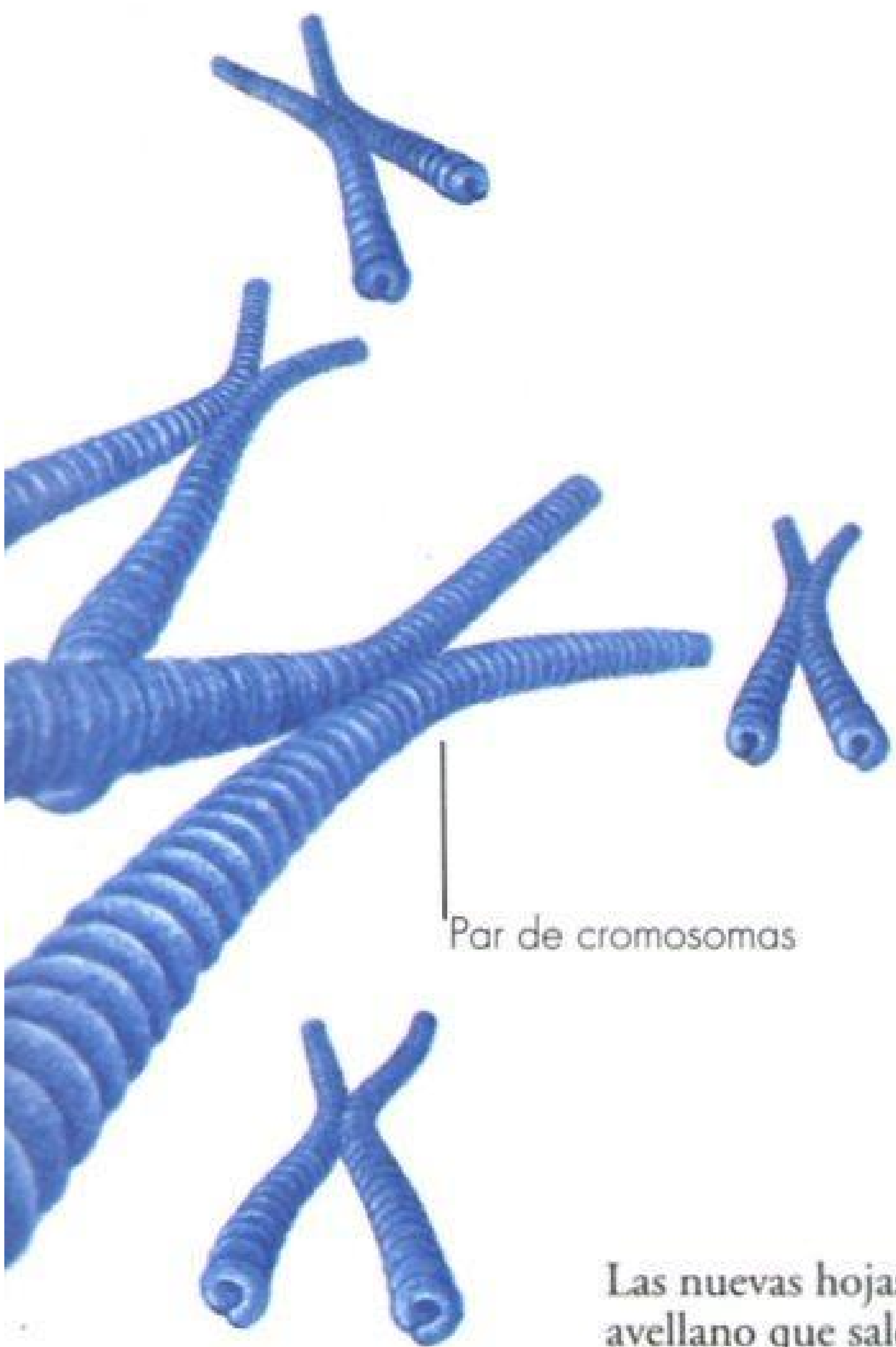
Citosina

Adenina

Timina

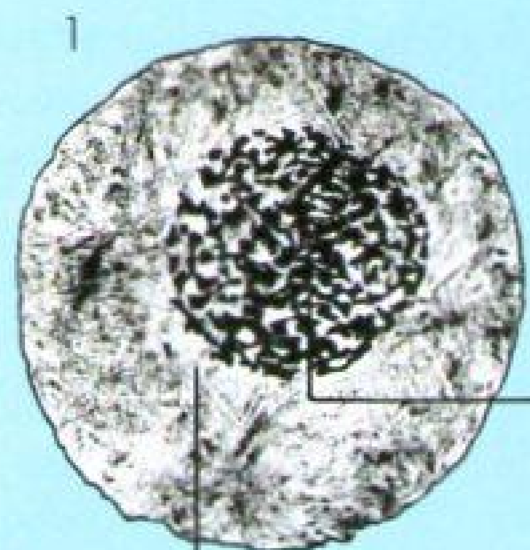
Guanina

En los cromosomas, la doble hélice de la molécula de ADN está empaquetada de un modo muy ordenado. Cada cromosoma contiene una sola molécula de ADN, de doble hélice e inmensamente larga, que está enrollada una y otra vez sobre sí misma, muy apretada, formando el cromosoma.
Las histonas son proteínas esenciales para el empaquetamiento del ADN. Los segmentos de ADN se enrollan alrededor de moléculas de histonas, formando bultos que se llaman nucleosomas. A su vez, los nucleosomas se enrollan formando estructuras aún más condensadas, los cromosomas, que puedan caber en el interior del núcleo.

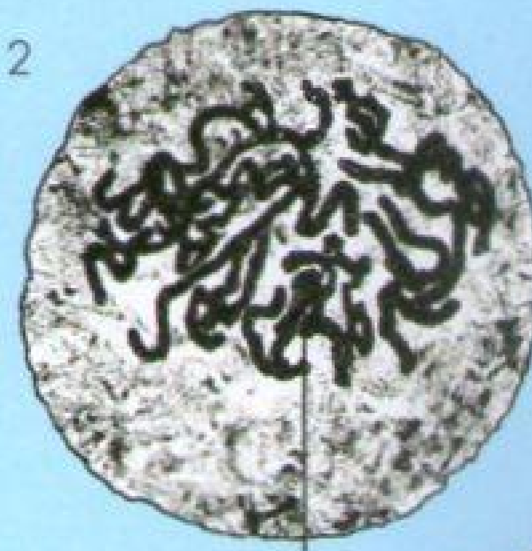




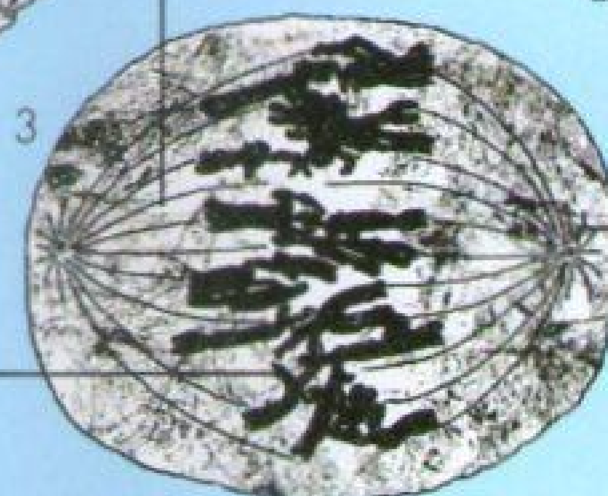
Las nuevas hojas de avellano que salen en primavera son el resultado de muchos miles de divisiones mitóticas.



1. La membrana nuclear se descompone y los cromosomas empiezan a condensarse.



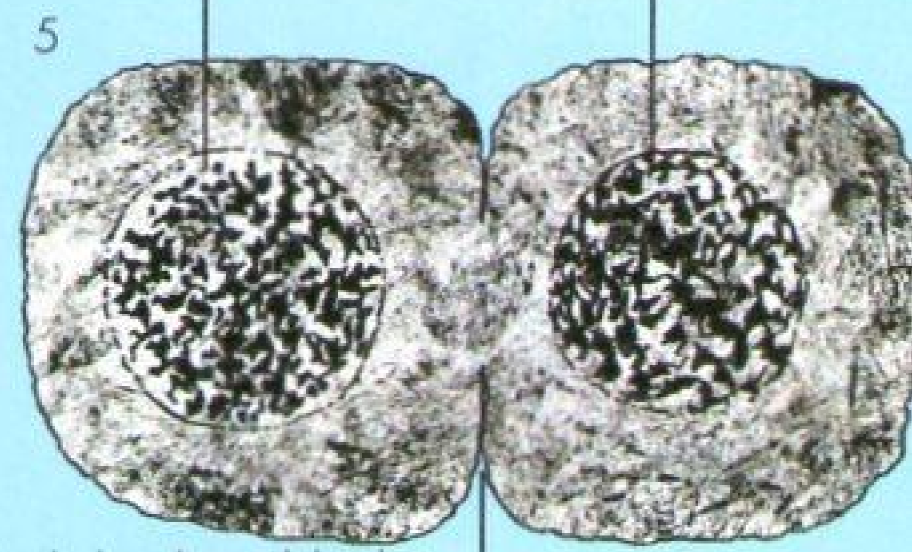
2. Los cromosomas se condensan aún más y se puede ver cómo se agrupan en parejas.



3. Se forma el huso, y los dos conjuntos idénticos de cromosomas empiezan a desplazarse hacia extremos opuestos de la célula.



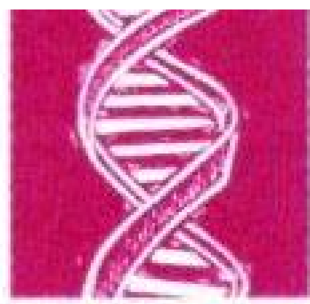
4. Los dos conjuntos de cromosomas quedan completamente separados, gracias a la tracción de las fibras del huso.



5. Se vuelven a formar núcleos en las dos células hijas. Cada núcleo queda rodeado por una nueva membrana nuclear.

MITOSIS

El crecimiento y desarrollo de los organismos pluricelulares resultaría imposible sin la división celular. Las células individuales se dividen en dos una y otra vez, pero antes de que se puedan dividir, hay que copiar el genoma —la dotación génica completa— y repartirlo en dos partes idénticas. La copia y la repartición tienen lugar en diferentes fases del ciclo celular: la copia, durante la fase sintética (S), en la que cada cromosoma se autoduplica a lo largo, quedando formado por dos mitades idénticas, o cromátidas.
A continuación, tiene lugar la repartición, durante la mitosis o fase M. Tras la descomposición de la membrana nuclear se forma el huso, un conjunto de fibras que tiran de cada una de las cromátidas de un cromosoma hacia extremos opuestos de la célula. El resultado es la formación de dos núcleos, idénticos al original.



LOS GENES Y EL AMBIENTE

Cuando Gregor Mendel explicó por vez primera los resultados de sus experimentos de cultivo de guisantes (pp. 60-61) afirmó que las plantas contenían dos factores, cada uno de los cuales desempeñaba una función potencial en el control de un carácter concreto. Los avances de la biología celular y molecular han permitido describir los factores de Mendel y sus efectos en términos más concretos, explicando la manera en que determinan la evolución y la herencia.

Mendel llegó a sus conclusiones trabajando sólo con lo que podía observar en las plantas de guisante: su aspecto físico, o fenotipo. En la actualidad, los científicos están igualmente familiarizados con la estructura genética, o genotipo, de un organismo. También saben que el fenotipo está determinado en parte por los genes y en parte por el ambiente y la experiencia.

Los «factores» de Mendel son genes, secciones concretas del ADN cromosómico, que representan la estructura de una proteína específica. El carácter binario de los factores de Mendel es consecuencia de la organización de los cromosomas. Cada núcleo celular contiene varios pares de cromosomas homólogos. Los dos cromosomas de cada par contienen genes equivalentes, exactamente en el mismo orden. En otras palabras, cada par de cromosomas contiene dos genes para cada carácter. Y la genética moderna ha demostrado que un carácter simple viene determinado por la producción de una única proteína.

Uno de los experimentos clásicos de Mendel, consistente en cruzar plantas de guisante de razas puras, una alta y otra baja, demuestra que el sistema de dos genes y su funcionamiento en la reproducción sexual han tenido profundas consecuencias en la herencia y la evolución. Cuando Mendel cruzó plantas altas con plantas bajas, todas las descendientes fueron altas: no había ninguna corta, ni de talla intermedia. A continuación, cruzó las plantas hijas entre sí, pero esta vez la siguiente generación no fue homogénea: había una proporción aproximada de tres plantas altas por cada planta baja.

Estos resultados indican que, al menos

Experimento 1: el mismo genotipo

Experimento 2: diferentes genotipos

Línea de árboles

Línea de árboles

Lago Tenaya

Valle de Aspen

Mather

Mather

Stanford (al nivel del mar)

Los estudios realizados en California con la milenrama (*Achillea borealis*) revelan la interacción de factores genéticos y ambientales en el fenotipo o aspecto exterior de una planta.
En el primer experimento se cultivaron clones genéticamente idénticos de *Achillea* en Mather, su lugar de origen, en Stanford (al nivel del mar), y en los montes de Sierra Nevada, a 3.000 metros de altitud. Aunque todas las plantas eran genéticamente idénticas, en cada lugar crecieron con diferente forma y tamaño. Al parecer, las variaciones se debieron a las diferentes influencias ambientales: temperatura, composición del suelo, etc.

En el segundo experimento se tomaron plantas de cinco altitudes diferentes y se cultivaron en Stanford, al nivel del mar, en las mismas condiciones. A pesar de ello, presentaban diferencias de tamaño y forma de las hojas, ya que sus genomas eran diferentes, por haberse adaptado a sus condiciones nativas. Las plantas cultivadas en Stanford seguían presentando el mismo aspecto que en su lugar de origen.

en este caso, la altura se transmite hereditariamente en unidades concretas; dado que no nació ninguna planta de altura intermedia, es evidente que no se había producido ninguna mezcla de caracteres. Los resultados demuestran también el funcionamiento del sistema de dos genes para cada carácter: si las primeras plantas altas poseen un gen determinante de la altitud (T) en cada cromosoma, y las plantas bajas un gen (t) que determina la poca altura, los resultados de Mendel se pueden explicar por la interacción de T y t. Cuando una planta alta de raza pura (TT) se cruza con una planta baja (tt), cada uno de los descendientes recibe un gen T de la planta alta y un gen t de la baja. Su genotipo será Tt. Pero al presentarse juntos, los efectos del gen T predominan sobre los del t, y todos los individuos Tt son altos. En lenguaje genético se dice que el gen T es dominante y el t recesivo.

Cuando se cruzan entre sí dos plantas Tt, cada una puede transmitir el gen T o el t, y la descendencia podrá presentar los genotipos TT, Tt, tT o tt. Pero como el T es dominante, las tres primeras combinaciones darán lugar a plantas altas y sólo la cuarta producirá plantas de baja estatura.

Los resultados revelan una importante relación entre el genotipo y el fenotipo. Las plantas TT y Tt tienen diferentes genotipos, pero ambas presentan el mismo fenotipo: si se les suministra agua, tierra y luz, los dos tipos producirán plantas altas. Sus diferencias genéticas sólo se manifestarán en los fenotipos de las generaciones siguientes.

Cada gen dirige la síntesis de una única proteína, pero hay muchos caracteres que dependen de la acción combinada de varios genes. Estos caracteres, como la estatura de los seres humanos, se dice que tienen herencia poligénica, y en estos casos las variaciones son mucho más sutiles, incluyendo fenotipos de grado intermedio.

Cuando se activan el gen del color amarillo y el del rojo intenso se forman flores rojas.

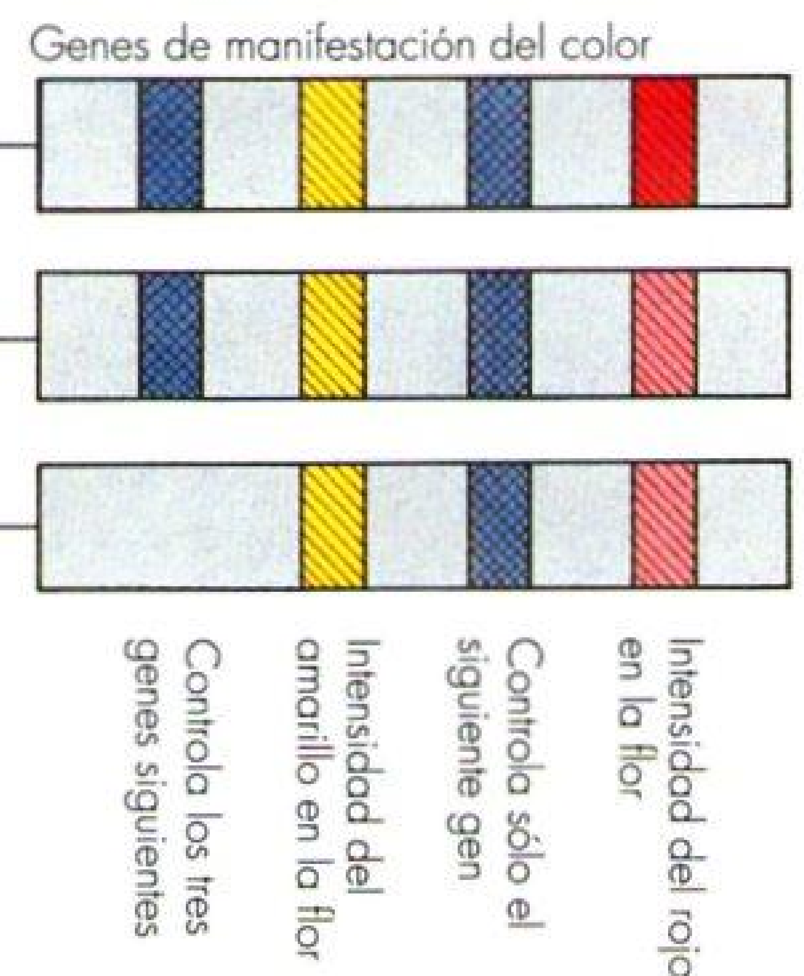


En las flores anaranjadas, el primer gen de control actúa, activando el gen responsable del color amarillo. El siguiente gen de control activa un gen que produce un color rojo de baja intensidad. La mezcla produce un color anaranjado.



Gen de control

Gen del color



El color de las flores está determinado por los genes. Algunos son genes «estructurales», que determinan directamente un color, y otros son genes de control, que activan o desactivan otros genes. Los antirrinos son plantas muy utilizadas en experimentos sobre la genética de las flores.



En las flores blancas no se produce pigmento rojo ni amarillo. Como el primer gen de control no se activa, tampoco se activa ninguno de los tres siguientes.



RECOMBINACIÓN GENÉTICA

Como sabe cualquier horticultor, hay plantas como las fresas que producen brotes capaces de desarrollarse hasta formar nuevas plantas, que serán genéticamente idénticas a la planta original. El único proceso genético que tiene lugar es la reproducción celular o mitosis, que produce clones del original.

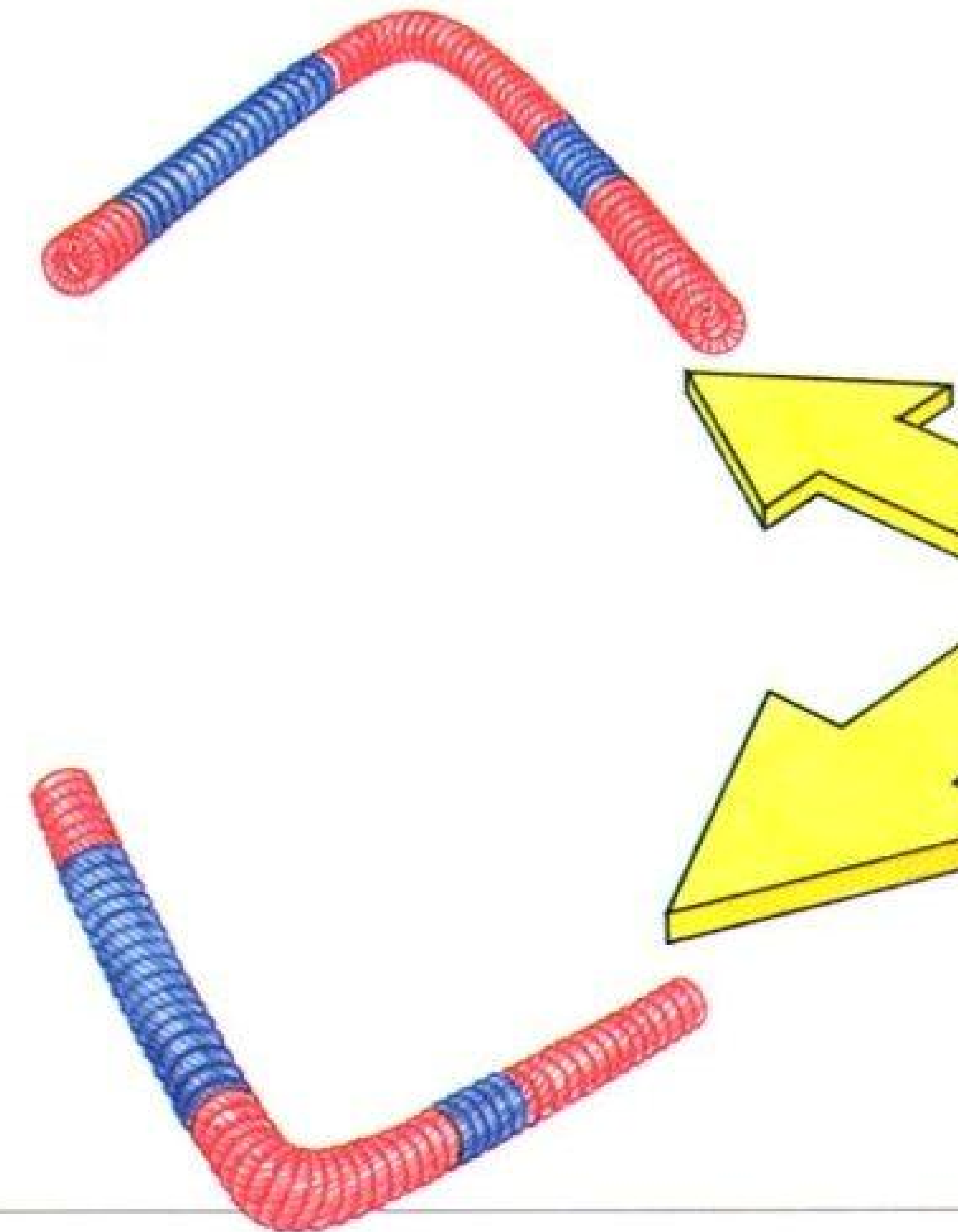
Pero la reproducción sexual no se caracteriza precisamente por esta similitud clónica entre los progenitores y su descendencia. Los hijos de cualquier pareja humana, por ejemplo, son inconfundiblemente humanos y pueden parecerse a sus padres, pero su dotación genética es exclusiva.

Esta originalidad es el resultado de los mecanismos genéticos que, al asegurar la diversidad de la descendencia, forman parte de las «materias primas» de la evolución. En cualquier especie, el objetivo reproductivo de un encuentro sexual es la fecundación y la combinación de un conjunto de genes de un progenitor con un conjunto análogo del otro. Esto tiene lugar cuando el espermatozoide masculino fecunda el óvulo de la hembra.

En el cuerpo humano, todas las células poseen idénticos genes en sus 23 pares de cromosomas. Uno de los cromosomas de cada par procede de la madre, y el otro del padre. Si las células sexuales se produjeran por mitosis, la fecundación provocaría una duplicación del número de cromosomas en cada generación sucesiva. Pero las células sexuales se originan mediante un proceso especial de reproducción celular, llamado meiosis. En este proceso, las células sexuales resultantes no contienen una dotación cromosómica completa, sino un solo conjunto de 23 cromosomas. Cuando tiene lugar la fecundación, los 23 cromosomas del espermatozoide se suman a los 23 del óvulo, formándose un zigoto con una dotación normal de 46 cromosomas.

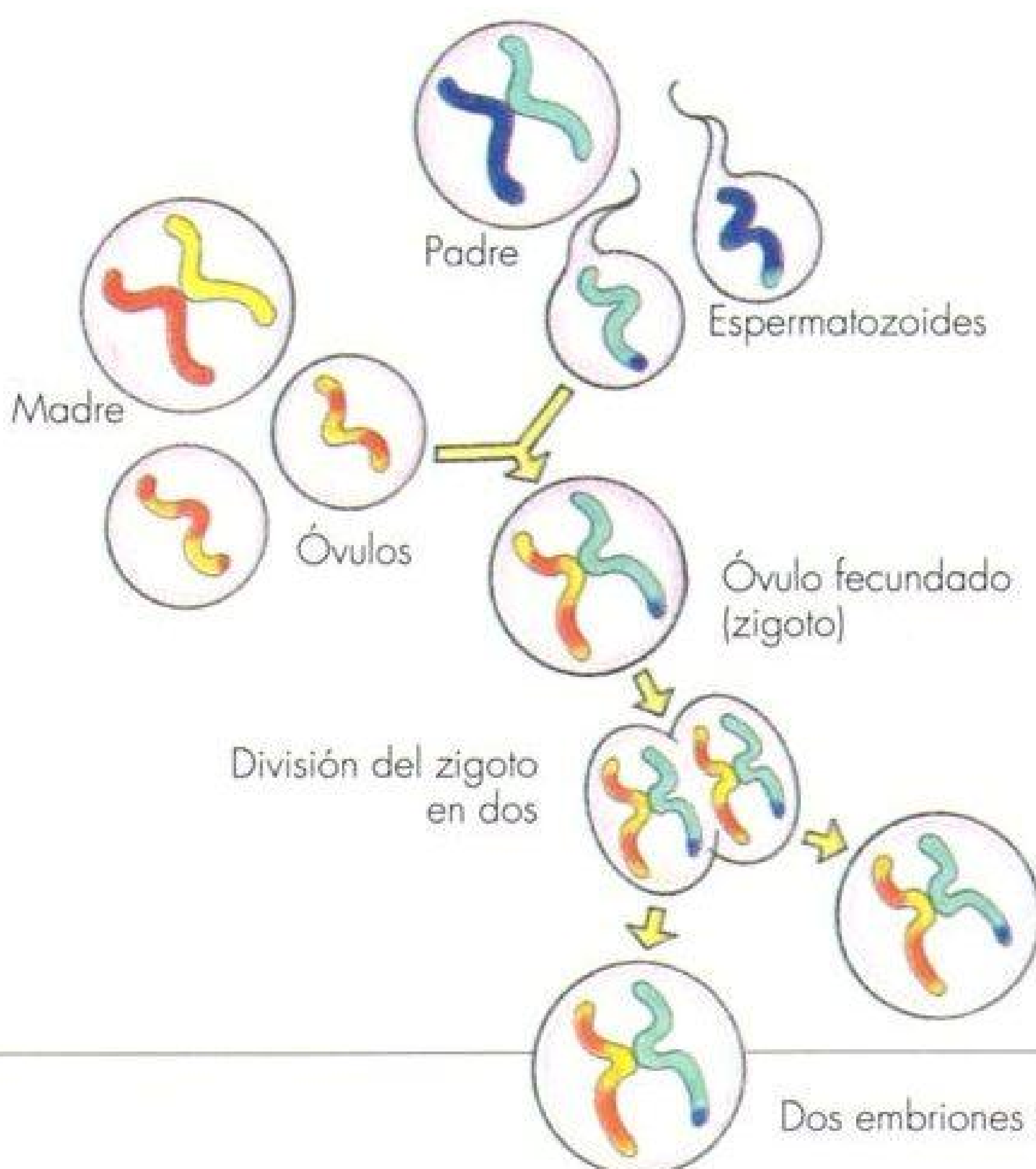
Pero esto no basta para explicar que cada una de las 5.000 millones de personas que viven en este planeta sea genéticamente diferente a las demás (con la excepción de los gemelos idénticos). Lo cierto es que los cromosomas de las células sexuales no son copias exactas de los cromosomas parentales. Si lo fueran, las posibilidades de diversidad en la descendencia quedarían muy limitadas. Durante la formación de una célula sexual, cada cromosoma de un par intercambia genes con su cromosoma homólogo, produciéndose una nueva combinación de genes. Así, el núcleo de cada célula sexual contiene 23 cromosomas recombinados, y los dos conjuntos de genes que cada hijo hereda de sus padres representan una mezcla única de caracteres.

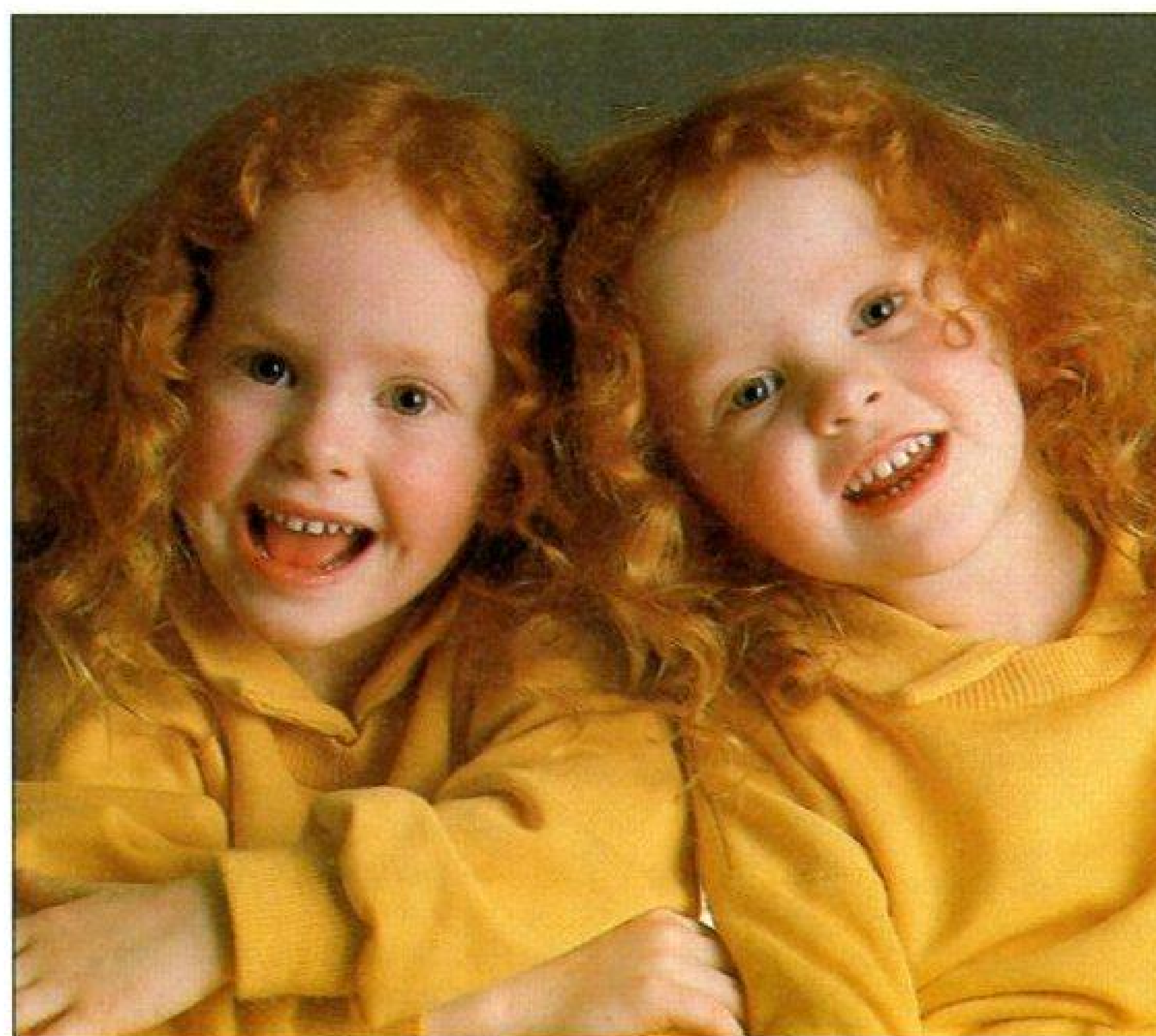
No obstante, los gemelos idénticos sí que tienen exactamente los mismos genes, ya que ambos proceden del mismo huevo fecundado. Por alguna razón aún desconocida, el embrión se divide en las primeras fases del desarrollo, dando lugar a dos criaturas.



GEMELOS

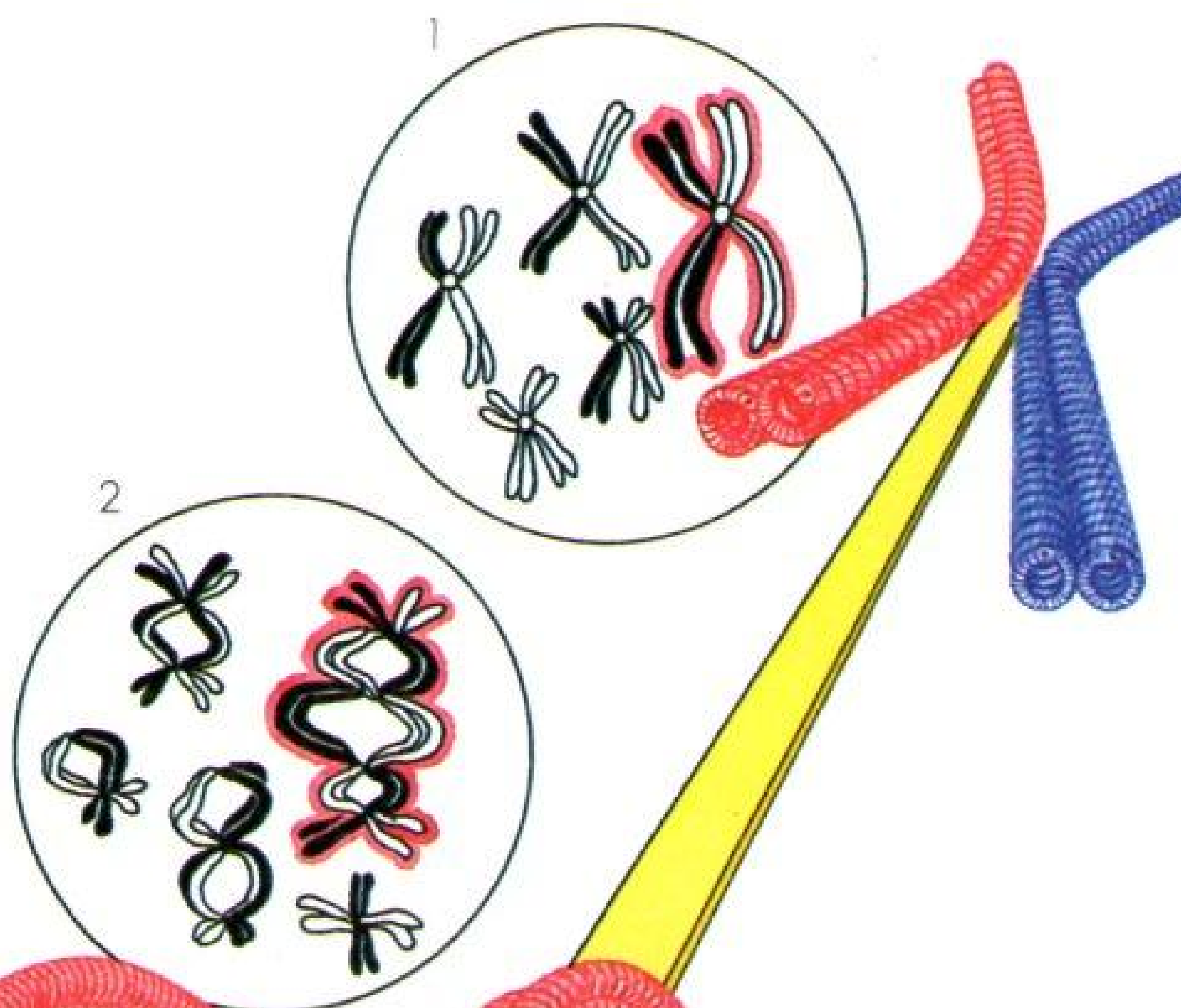
El hecho de que algunas parejas de gemelos sean idénticas y otras no, se debe a diferencias en las primeras fases del desarrollo.
Los gemelos idénticos proceden de un único óvulo fecundado, pero el embrión resultante se dividió en dos al comenzar su desarrollo, formándose dos embriones idénticos, con la misma dotación genética, que dan lugar a dos gemelos exactos.







Las células sexuales o gametos —óvulos y espermatozoides— se producen, respectivamente, en los ovarios y los testículos, mediante un proceso genético denominado meiosis. En ciertas células especializadas, cada par de cromosomas se duplica, y a continuación los cromosomas intercambian genes con sus homólogos en ciertos puntos de sobrecruzamiento, dando como resultado cuatro dotaciones cromosómicas haploides diferentes. Cada óvulo y espermatozoide recibe uno de estos conjuntos de material genético: 23 cromosomas, en el caso de los seres humanos. Cuando el óvulo y el espermatozoide se fusionan en la fecundación, se restaura el número diploide de 46 cromosomas (23 pares).



1. Al comienzo de la meiosis, los cromosomas de una célula ovárica o testicular se emparejan por los costados. A continuación, cada par de cromosomas se autoduplica, formándose cuatro filamentos unidos por un centrómero.

2. En los puntos de sobrecruzamiento, o quiasmas, se cortan e intercambian segmentos de los cromosomas. Los puntos de sobrecruzamiento no son necesariamente idénticos, como en los cromosomas de la figura.

3

3. Una vez recombinado el material genético, los pares de cromosomas, ahora con nuevas combinaciones de genes, se reparten entre los dos nuevos núcleos y la célula se divide en dos.

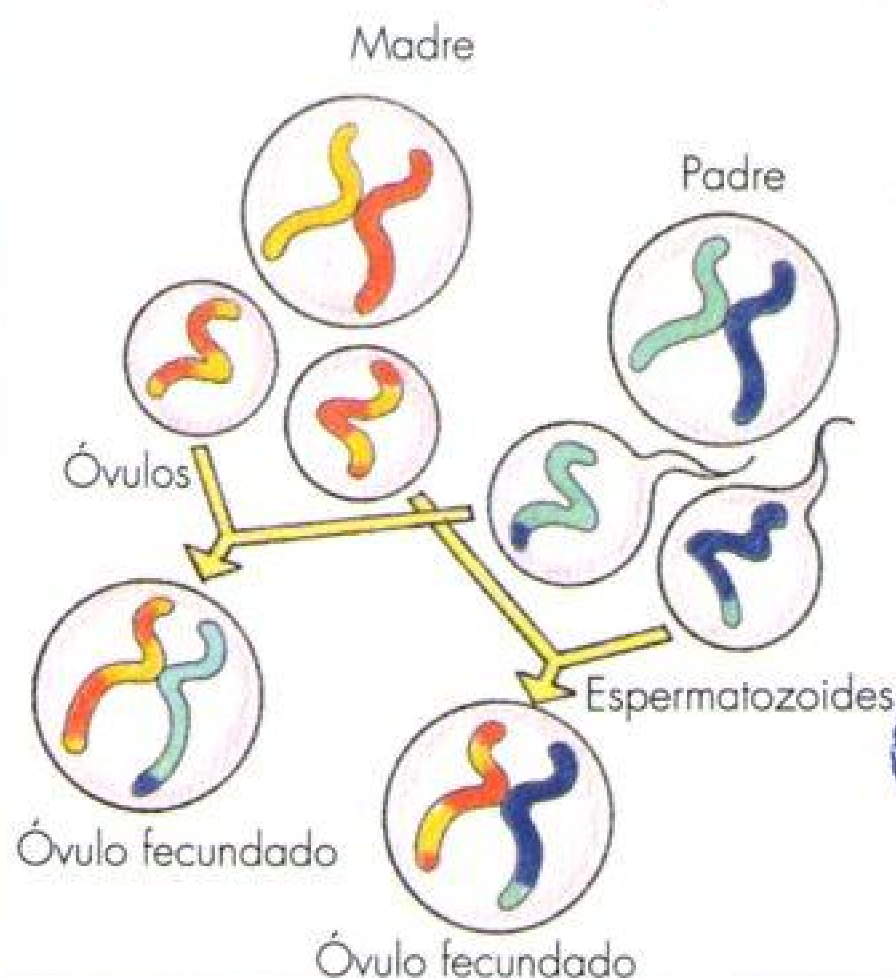
4

4. El mismo proceso tiene lugar en los otros 22 pares de cromosomas de la dotación humana. En la siguiente división nuclear y celular, los pares de cromosomas se separan y cada célula sexual recibe media dotación de cromosomas recombinados.

Los gemelos no idénticos proceden de dos óvulos diferentes, que fueron fecundados al mismo tiempo.



En este caso, cada embrión es diferente, y los niños, aunque nazcan al mismo tiempo, no se parecen más que dos hermanos cualesquiera.





¿QUIÉN NECESITA EL SEXO?

En el momento de la fecundación se libera nuevo potencial evolutivo. Cuando un espermatozoide (o un grano de polen) fecunda un óvulo, se combinan los genes de ambos progenitores y se forma un nuevo individuo, genéticamente único. Lo curioso es que el sexo y la reproducción sexual están tan extendidos entre los organismos pluricelulares que se suelen pasar por alto dos preguntas básicas: ¿Por qué recurrir a este sistema y cómo es que la evolución lo ha seleccionado positivamente?

En los ciclos vitales de la mayoría de los eucariontes hay una constante alternancia entre los estados diploide (dotación cromosómica completa) y haploide (reducida a la mitad). En los animales pluricelulares más complejos, como el ser humano, la fase haploide ha quedado reducida a los gametos: óvulos y espermatozoides. En todos los demás estados del desarrollo —larvario, fetal o adulto—, todas las células poseen una dotación cromosómica completa.

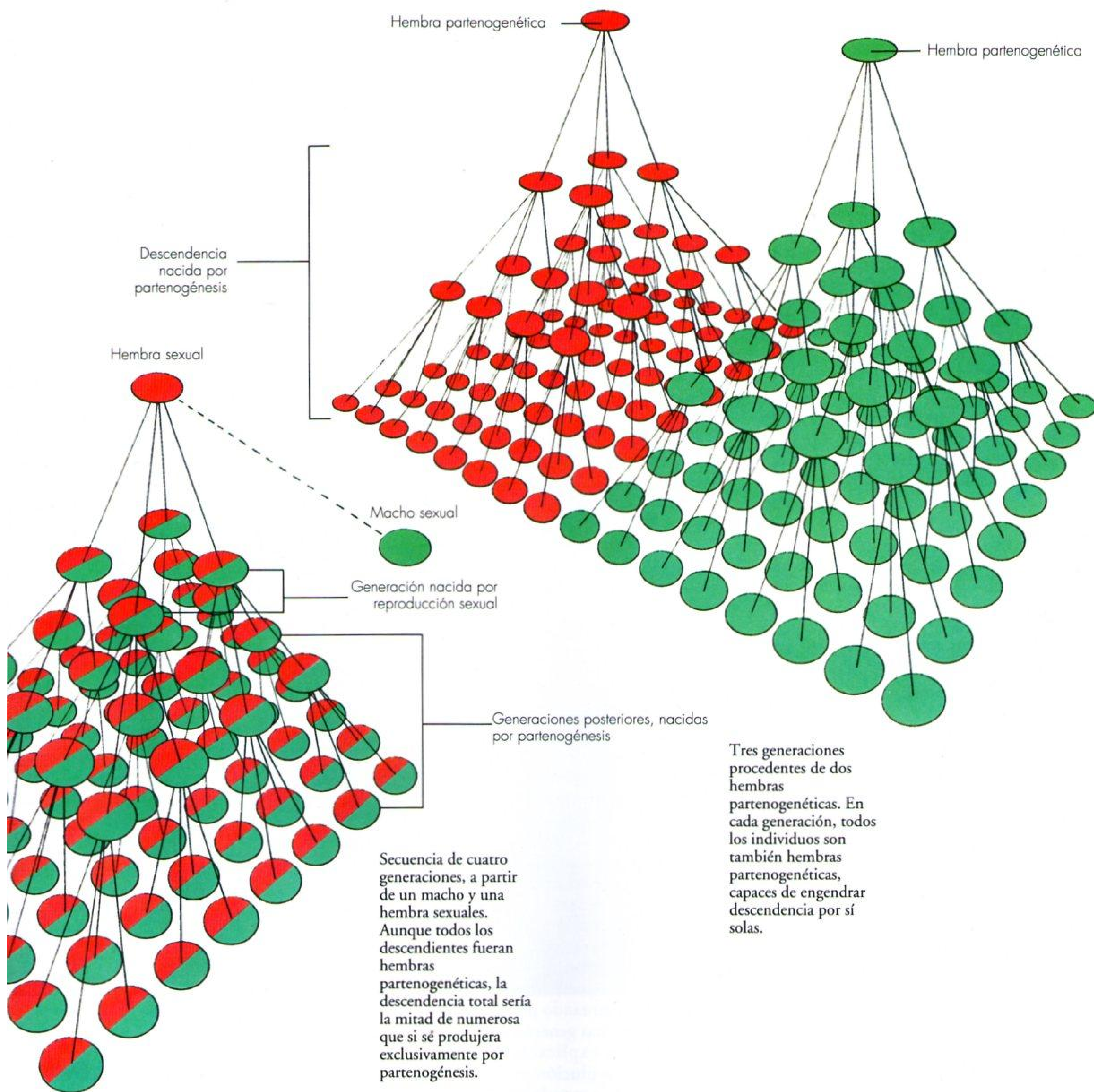
En las plantas superiores —las plantas con flores—, la pauta haploide/diploide es similar. Sólo el tubo polínico masculino y el óvulo femenino son haploides, y el resto de la planta es diploide. Pero en las plantas sin flores el ciclo vital puede constar de dos generaciones alternantes: una planta haploide o gametofito, seguida por otra diploide o esporofito (pp. 38-39). En los musgos, por ejemplo, la planta principal es el gametofito. En algunos helechos, la planta frondosa que conocemos es el esporofito, y la forma haploide que alterna con ella es una plantita parecida a una hepática.

Sea cual sea el ciclo vital utilizado para la reproducción sexual, lo normal es que los gametos masculino y femenino sean diferentes. Sólo en algunos protozoos y algas unicelulares los gametos son idénticos. Los gametos masculinos —por ejemplo, los espermatozoides— son pequeños, móviles y muy numerosos, mientras que los femeninos u óvulos son más grandes, no se mueven y sólo se producen unos pocos, generalmente rodeados por reservas nutritivas para facilitar el desarrollo y crecimiento de los embriones después de la fecundación.

En los ciclos vitales en los que los gametos haploides no son idénticos, es el huevo fecundado o zigoto (que ha recuperado la condición diploide) el que da lugar a un nuevo individuo. Esta situación presenta una asimetría inherente: si todo sale como es debido (es decir, si es fecundado), un óvulo puede dar lugar a un nuevo individuo, pero un espermatozoide no. Sin embargo, si los óvulos siempre tuvieran que ser fecundados para seguir desarrollándose, y si la reproducción sexual fuera el único sistema para generar nuevos individuos, el sexo sería obligatorio para todos los organismos.

Pero lo cierto es que se pueden generar nuevos individuos sin ningún proceso sexual. La fecundación no siempre es esencial, ni siquiera en organismos que llevan a cabo una producción normal de gametos. Existe una forma de reproducción asexual llamada partenogénesis («el parto de las vírgenes»), que practican organismos como los pulgones, y que puede dar lugar a nuevos individuos a partir de huevos sin fecundar.

Hembras adultas de pulgón, rodeadas de crías engendradas por partenogénesis.



Tres generaciones procedentes de dos hembras partenogenéticas. En cada generación, todos los individuos son también hembras partenogenéticas, capaces de engendrar descendencia por sí solas.

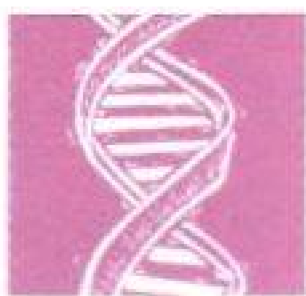
Secuencia de cuatro generaciones, a partir de un macho y una hembra sexuales. Aunque todos los descendientes fueran hembras partenogenéticas, la descendencia total sería la mitad de numerosa que si sé produjera exclusivamente por partenogénesis.

Así pues, si el impulso más imperioso de los organismos es el de reproducirse (ellos y sus genes) tantas veces como sea posible en el curso de sus vidas, ¿por qué el sexo parece ser el mecanismo más utilizado para conseguirlo? A primera vista, las estrategias de reproducción asexual como la partenogénesis deberían salir triunfadoras en una competición evolutiva directa contra la reproducción sexual.

Dicho de otro modo: puesto que los machos por sí solos no son capaces de generar nuevos individuos, todo macho que aparezca en la descendencia es un despilfarro en términos de eficiencia reproductiva.

Mediante la partenogénesis, una hembra engendra nuevas hembras que, a su vez, pueden seguir engendrando hembras en generaciones sucesivas. Evidentemente, este sistema de reproducción es capaz de producir descendencia —y por consiguiente, copias de sus genes— con el doble de eficiencia que un sistema sexual en el que los machos constituyen la mitad de cada generación (ver ilustración). Y otras formas eficaces de reproducción asexual, como la gemación y la escisión celular, también producirían descendencia y copias de sus genes a un ritmo mucho más rápido que el sexo.

Pero, a pesar de ser utilizados con éxito por los pulgones y otros organismos, los sistemas reproductivos como la partenogénesis no han conseguido superar la prueba de la selección natural, pues de lo contrario serían predominantes en todo el mundo vivo desde hace mucho tiempo. Y la razón es que existen fuerzas selectivas muy potentes que impiden que esto suceda.



¿QUIÉN NECESITA EL SEXO? / 2

Una buena manera de investigar estas fuerzas selectivas favorables al sexo consiste en estudiar las distintas modalidades de reproducción asexual y averiguar qué es lo que impide que se generalicen en las poblaciones.

Además de la partenogénesis, existen otros métodos de reproducción asexual que excluyen por completo el empleo de gametos. Los nuevos individuos se forman por reproducción mitótica de una célula corporal o de un grupo de células normales del cuerpo. Las fresas, que producen brotes rastreros capaces de formar nuevas plantas, los bulbos y cormos de otros vegetales y la gemación de los corales son ejemplos de reproducción asexual. A menos que se produzca una mutación genética durante el proceso, los descendientes serán genéticamente idénticos a sus progenitores. En otras palabras, estos organismos producen clones de sí mismos.

Aunque la partenogénesis presenta muchas y complicadas variantes, su difusión es muy irregular entre los eucariontes actuales. Las especies partenogenéticas existentes suelen tener parientes muy cercanos que se reproducen sexualmente, o que utilizan la partenogénesis paralelamente a la reproducción sexual, en el mismo ciclo vital.

Los mamíferos y las plantas gimnospermas como las coníferas, cuyas semillas no están encerradas en un ovario, parecen evitar por completo la partenogénesis, mientras que los pulgones y las pulgas de agua alternan entre el sexo y la partenogénesis. Todo parece indicar que ningún grupo importante de organismos (con la posible excepción de un grupo de invertebrados rotíferos) ha conseguido evolucionar y diversificarse durante mucho tiempo utilizando exclusivamente la partenogénesis.

Se han propuesto dos argumentos diferentes para tratar de explicar esta persistente desventaja evolutiva de la reproducción asexual. Según el primero, la reproducción sexual sale triunfante a largo plazo porque la fusión de gametos de diferentes individuos y la recombinación genética producen constantemente una gran variación dentro de la especie, que le permite adaptarse a nuevos ambientes mediante cambios adaptativos.

Los efectos de las mutaciones en organismos individuales pueden ayudar a definir las ventajas de la reproducción sexual. La mutación se produce cuando se altera la estructura de un gen. Supongamos que en diferentes individuos de una misma población aparecen dos mutaciones beneficiosas, cuyo resultado es un aumento de la fertilidad. Poco a poco, la frecuencia de ambas mutaciones irá aumentando, por efecto de la selección natural.

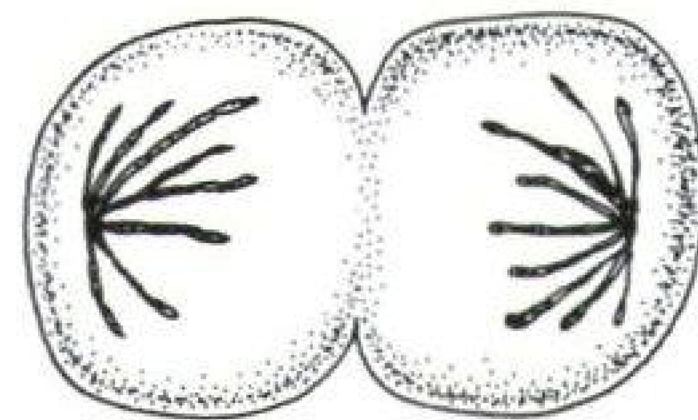
En una población que se reproduzca sexualmente, ambas mutaciones pueden acabar por combinarse en un mismo individuo, a consecuencia de los apareamientos. En cambio, en una población con reproducción asexual, esta combinación sólo puede darse si la segunda mutación se produce espontáneamente en un individuo que ya posea la primera. En consecuencia, la combinación de mutaciones benéficas es más rápida con sexo que sin él. En pocas palabras: los grupos que se reproducen sexualmente evolucionan con más rapidez que los que se reproducen asexualmente.

El segundo argumento a favor del sexo indica que las mutaciones perjudiciales (no precisamente letales) pueden acumularse con más facilidad en las poblaciones con reproducción asexual. Supongamos que sólo una pequeña parte de la población está libre de mutaciones perjudiciales, como por ejemplo la incapacidad de digerir un alimento concreto. Si en alguna generación estos individuos no consiguieran reproducirse, la proporción se reduciría a cero. Una población asexual puede ser incapaz de superar esta pérdida, pero una población sexual podría conseguirlo mediante recombinación genética en la siguiente generación. Incluso es posible que la proporción de mutaciones desventajosas en las poblaciones partenogenéticas vaya aumentando progresivamente a lo largo de muchas generaciones.

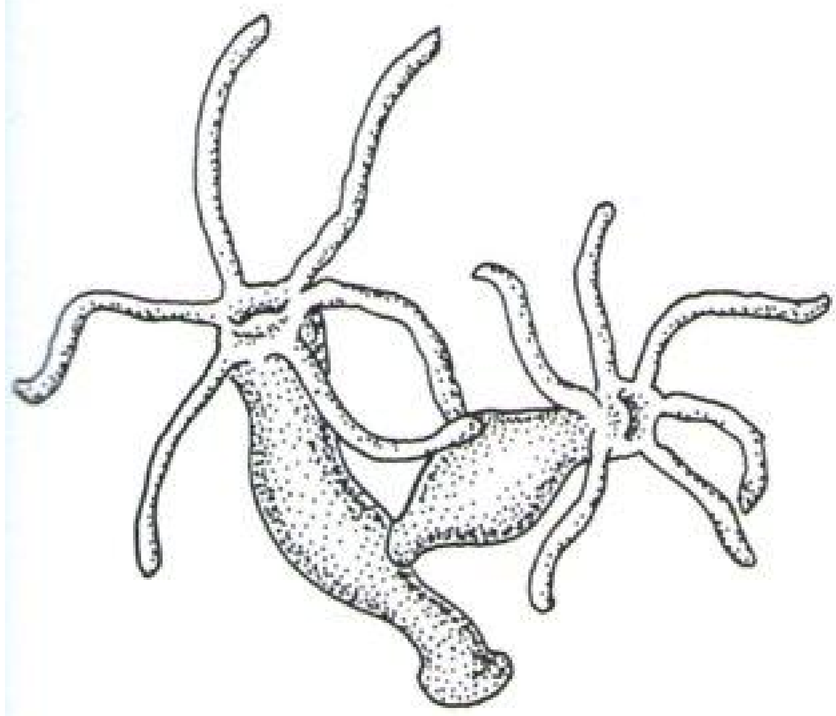
Estas dos explicaciones —la mayor rapidez de evolución en las poblaciones sexuales y la acumulación de mutaciones deletéreas en las poblaciones partenogenéticas— pueden ayudar a entender una de las normas del mundo vivo: en los organismos eucariontes y pluricelulares, lo normal es el sexo.

Para los procariontes, la situación es más compleja. Ni las bacterias ni las algas verde-azuladas tienen verdadera reproducción sexual. Pero ahora se sabe que las bacterias utilizan diversos mecanismos para transferir genes de un organismo unicelular a otro, en una especie de «seudosexo» (pp. 188-191).

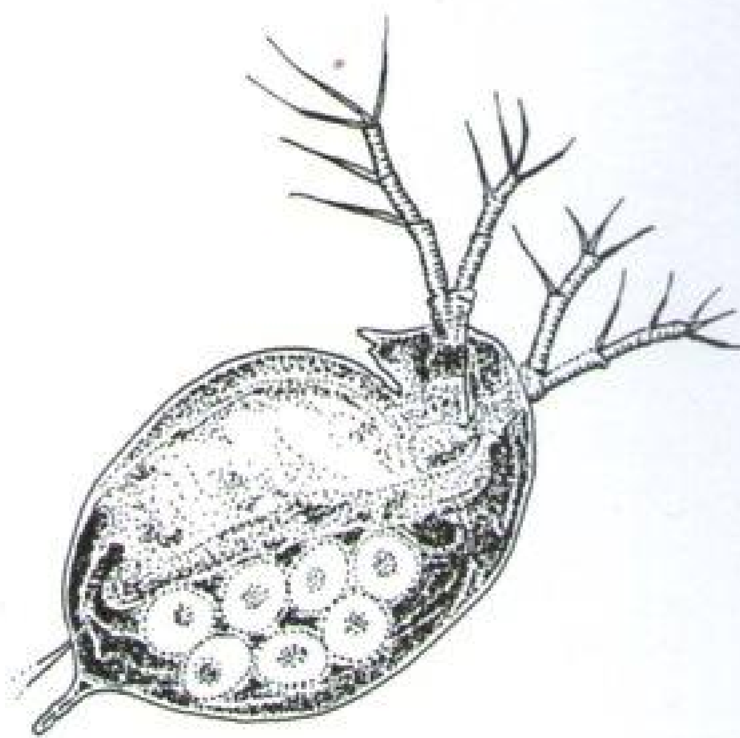




La división celular simple o mitosis es una forma de reproducción asexual utilizada por organismos unicelulares, como los protozoos y algunas algas.



La reproducción asexual por gemación es corriente en animales sencillos, como la hidra. Por múltiples divisiones celulares se forma una diminuta versión del progenitor, que crece en un costado de éste hasta que se desprende.



La partenogénesis, o parto de las vírgenes, es utilizada por ciertos crustáceos, como la pulga de agua *Daphnia*. Los huevos no fecundados pueden dar lugar a nuevos individuos.



En la reproducción sexual ortodoxa, un espermatozoide haploide se fusiona con un óvulo también haploide, formando un zigoto diploide, que se transforma en un nuevo individuo.

El sexo de la descendencia depende tanto de factores genéticos como de influencias ambientales. El cocodrilo del Nilo, por ejemplo, entierra sus huevos y los vigila mientras están incubando. La temperatura a que se incluban determina si nacerán hembras o machos. A 30º C, todas las crías son hembras; a 33º C, todas son machos.

LAS MATERIAS PRIMAS DE LA EVOLUCIÓN

Las mutaciones tienen mala prensa. A menudo se las relaciona con los mutantes de las historias de terror y ciencia-ficción, o con los peligros de la radiación atómica. Pero en realidad, en el mundo de los seres vivos y en la historia de la vida sobre la Tierra, las mutaciones constituyen la materia prima de los cambios evolutivos.

Una mutación no es más que un cambio identificable en la constitución genética de un individuo, una alteración en la secuencia de bases de su ADN (pp. 60-61). Y ésta es la clave de la evolución, ya que las mutaciones representan las variaciones intrínsecas sobre las que actúa la selección natural. Algunas mutaciones pueden dar origen a los deformes monstruos de la ciencia-ficción, pero otras pusieron en marcha los mecanismos por los que las aletas de ciertos peces se transformaron en patas de anfibios, las escamas de los reptiles se convirtieron en plumas de ave y los seres humanos acabaron adquiriendo un cerebro más grande y complicado que el de sus antepasados primates.

Los genetistas han descubierto que las mutaciones se pueden deber a distintas causas: la radiación, la acción de sustancias químicas conocidas como mutágenos, o accidentes ocurridos en los procesos de copia y construcción del ADN.



Las plumas de las aves han debido evolucionar a partir de formas mutadas de escamas de reptil. Posteriores mutaciones han dado lugar a la enorme diversidad que se aprecia en las aves actuales.

EL GEN DE LA ANEMIA FALCIFORME

La anemia falciforme se debe a un gen hereditario que dirige la producción de hemoglobina humana. El gen mutante, conocido como *HbS*, produce un tipo de hemoglobina que se diferencia de la normal en un solo aminoácido. Sin embargo, este minúsculo cambio provoca una serie de alteraciones en las personas portadoras del gen. Algunos de los glóbulos rojos de su sangre cambian de forma, haciéndose espinosos e irregulares: son los llamados glóbulos falciformes, que tienen tendencia a apelotonarse y funcionan con menos eficiencia, produciendo trastornos leves en las personas con un solo gen *HbS* y otro normal. Pero en las personas con dos genes *HbS*, la enfermedad es mucho más grave y puede ocasionar la muerte. A pesar de estos efectos nocivos, el gen *HbS* se encuentra bastante difundido en África. Esta aparente paradoja se debe a que este gen proporciona una considerable protección contra la malaria, una enfermedad frecuentemente letal, también muy difundida en África. Debido a esta protección, en las zonas donde predomina la malaria (ver mapas) se produce una selección positiva del gen de la anemia falciforme, ya que sus ventajas superan a los inconvenientes de la enfermedad.



Los glóbulos rojos de la sangre de un portador del gen de la anemia falciforme, vistos al miscroscopio electrónico *(izquierda)*. Las células alargadas y espinosas son las falciformes; la redonda es un glóbulo normal.



Distribución de la malaria en África

Las mutaciones se pueden clasificar en cuatro categorías. La primera es una sustitución de bases: en un segmento de ADN, la base de un nucleótido es sustituida por otra. Esto puede tener diversas consecuencias en un gen que codifica una proteína. Si se altera el significado del código de tripletas del gen, la proteína resultante tendrá un aminoácido cambiado por otro. Esto es lo que sucede cuando el gen determinante de la hemoglobina normal sufre una mutación, transformándose en el gen que determina la anemia falciforme.

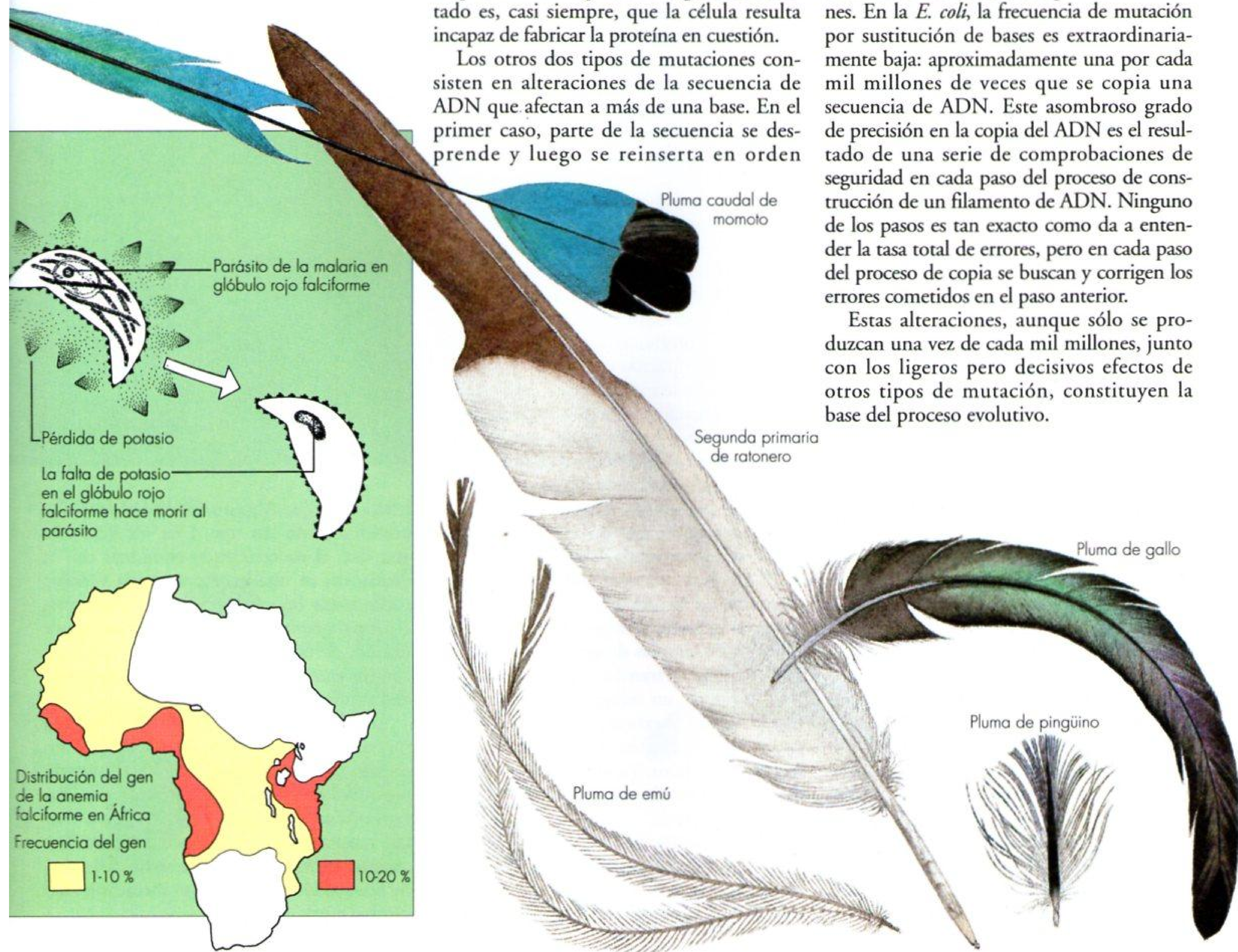
Algunos códigos de tripletas son sinónimos: es decir, codifican el mismo aminoácido. En este caso, si las mutaciones de sustitución dan lugar a tripletas sinónimas, el ADN se altera, pero la proteína resultante es la misma, por lo que estas mutaciones tienen poco efecto y apenas intervienen en el proceso evolutivo. Pero si la mutación no es sinónima, los efectos de la sustitución de un solo aminoácido pueden ser beneficiosos, indiferentes o letales, según la importancia y función del aminoácido afectado.

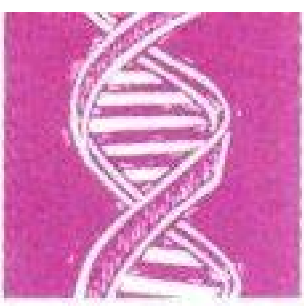
El segundo tipo de mutación consiste en un cambio en la secuencia de bases del ADN, debido a la inserción o delección de un nucleótido. En este caso, los efectos de la mutación son mucho más graves, porque este cambio provoca un «corrimiento del marco de lectura» a la hora de interpretar el código de tripletas. La inserción o delección de una base altera todas las tripletas situadas a partir del cambio, que se leerán comenzando una base antes o una base después de lo que era su configuración original. El resultado es, casi siempre, que la célula resulta incapaz de fabricar la proteína en cuestión.

Los otros dos tipos de mutaciones consisten en alteraciones de la secuencia de ADN que afectan a más de una base. En el primer caso, parte de la secuencia se desprende y luego se reinserta en orden inverso. En el segundo, se duplica o suprime toda una secuencia. La influencia de estos cambios sobre el fenotipo de un organismo (pp. 66-67) depende de la longitud de la secuencia y de su posición en el cromosoma. Por ejemplo, una sección invertida en un gen funcional que codifique una proteína dará lugar casi siempre a una proteína defectuosa. Sin embargo, los efectos de una inversión o una duplicación en una secuencia no codificadora, intermedia entre dos genes, resultará mucho menos perjudicial, porque las partes funcionales de los genes se mantendrán intactas.

Mediante laboriosos experimentos con organismos como la bacteria intestinal *E. coli* y la mosca de la fruta *Drosophila,* los genetistas han conseguido calcular la frecuencia de los diferentes tipos de mutaciones. En la *E. coli*, la frecuencia de mutación por sustitución de bases es extraordinariamente baja: aproximadamente una por cada mil millones de veces que se copia una secuencia de ADN. Este asombroso grado de precisión en la copia del ADN es el resultado de una serie de comprobaciones de seguridad en cada paso del proceso de construcción de un filamento de ADN. Ninguno de los pasos es tan exacto como da a entender la tasa total de errores, pero en cada paso del proceso de copia se buscan y corrigen los errores cometidos en el paso anterior.

Estas alteraciones, aunque sólo se produzcan una vez de cada mil millones, junto con los ligeros pero decisivos efectos de otros tipos de mutación, constituyen la base del proceso evolutivo.





LA SELECCIÓN NATURAL

La historia de los éxitos de la evolución —y también la de sus fracasos— ha dependido siempre de la selección natural. Un organismo individual, dotado de nuevas características provocadas por mutaciones en su ADN, tiene que ponerse a prueba. Si demuestra estar lo suficientemente adaptado para sobrevivir y reproducirse con más frecuencia que los tipos preexistentes, sus nuevas características (y las mutaciones que las provocaron) se difundirán en las poblaciones de su especie, por medio de la selección natural.

Darwin sacó esta idea de los procesos artificiales que utilizan los criadores para desarrollar trigo con espigas más grandes o cerdos con carne más tierna. En la actualidad, los genetistas pueden emular a la selección natural en sus laboratorios (llevan décadas haciéndolo), experimentando con características concretas de organismos de reproducción rápida, como las moscas de la fruta.

Pero en la naturaleza, este tipo de selección actúa constantemente, sin que ningún genetista decida qué individuos se reproducirán y cuáles no. Una especie que demuestra esto con claridad es la polilla geómetra del abedul, *Biston betularia*, de la que existen dos variedades, una moteada y la otra negra. La variedad moteada era la más común hasta el siglo XIX; a partir de entonces, la variedad negra pasó a predominar en las zonas industrializadas. En años recientes, la variedad moteada ha vuelto a aumentar en número.

Cuando las polillas se posan sobre los troncos de los árboles, cubiertos de liquen, los individuos moteados quedan camuflados y a salvo de los ataques de las aves insectívoras. Pero cuando el hollín de las chimeneas de las casas y las fábricas mató a los líquenes y ennegreció los troncos de los árboles, la variedad negra se encontró mejor camuflada.

En este caso, los agentes de la selección natural fueron las aves. En el siglo XIX, los pájaros devoraron muchas más polillas moteadas que negras, porque eran más fáciles de divisar. Las negras se pudieron reproducir más, alterando la estructura genética de la población de polillas. Pero ahora, con las regulaciones modernas contra la emisión de hollín y la recesión industrial, está ocurriendo lo contrario y las polillas moteadas vuelven a ser numerosas.

Desde los tiempos de Darwin, los escépticos han aceptado los cambios «microevolutivos» a pequeña escala, como los que afectan al número de cerdas de las moscas de la fruta o al color de las alas de las polillas. Pero se



El búho nival es un ave depredadora de las regiones árticas. El color blanco de sus plumas le proporciona un ventajoso camuflaje en su hábitat nevado.

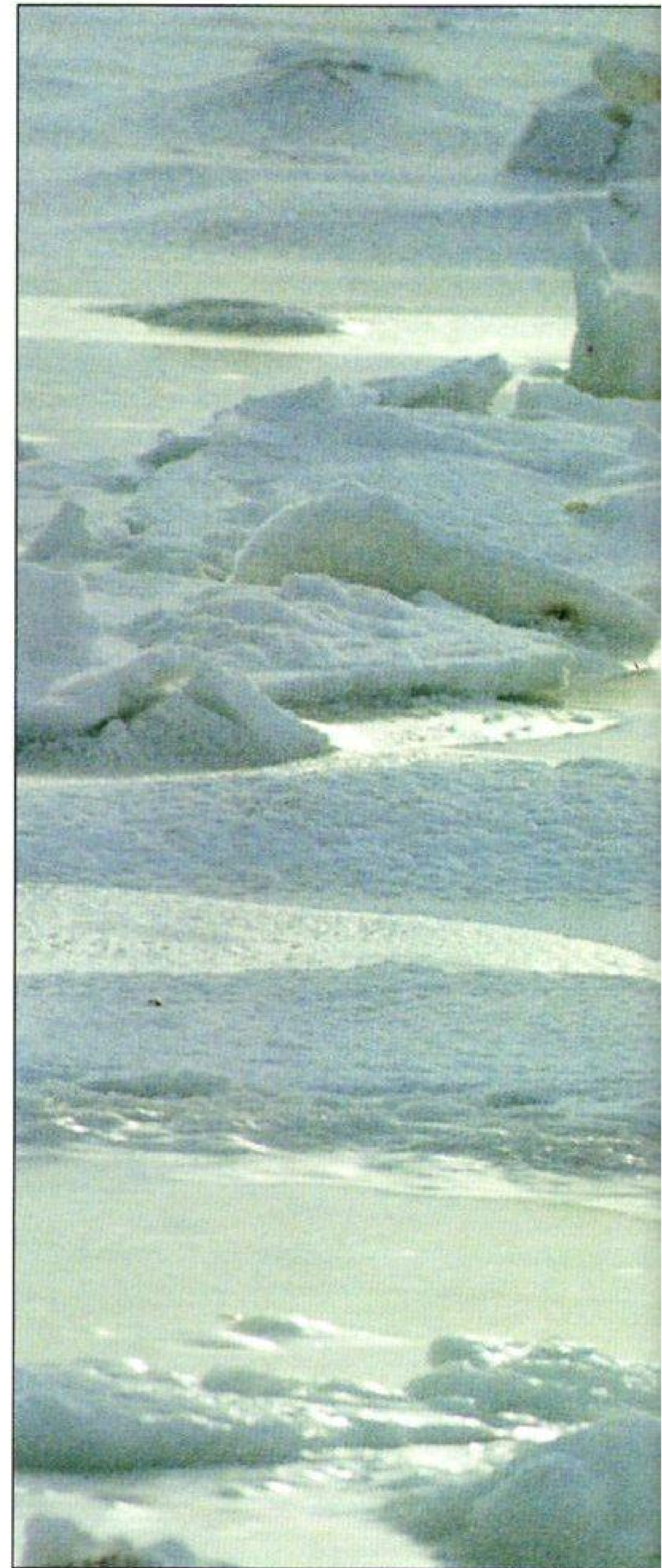
resisten a aceptar la idea de que la acumulación de pequeños cambios adaptativos pueda generar sistemas orgánicos complejos.

Un ejemplo que puede resumir esta polémica es el ojo de los vertebrados. Esta complicada pieza de maquinaria orgánica combina componentes ópticos, estructurales y nerviosos, que interaccionan unos con otros. ¿Cómo es posible —preguntan los incrédulos— que un ojo tan complicado evolucionara mediante mutaciones y selección natural?

La comparación entre los componentes de este ojo y otros tipos de ojos más sencillos que existen en el reino animal demuestra que las complejidades de este órgano pudieron ir surgiendo por etapas, ninguna de las cuales tuvo por qué ser tan radicalmente distinta como para considerarla imposible.

El ojo pudo empezar por ser una simple depresión en la piel, con células sensibles a la luz en el fondo. Los gusanos platelmintos poseen ojos simples de este tipo. La depresión se pudo ir transformando en un agujero, y éste en un receptáculo esférico, con una pequeña abertura que lo comunicara con el mundo exterior. El *Nautilus*, un cefalópodo primitivo, posee exactamente este tipo de ojos, que le permiten captar la dirección de los objetos.

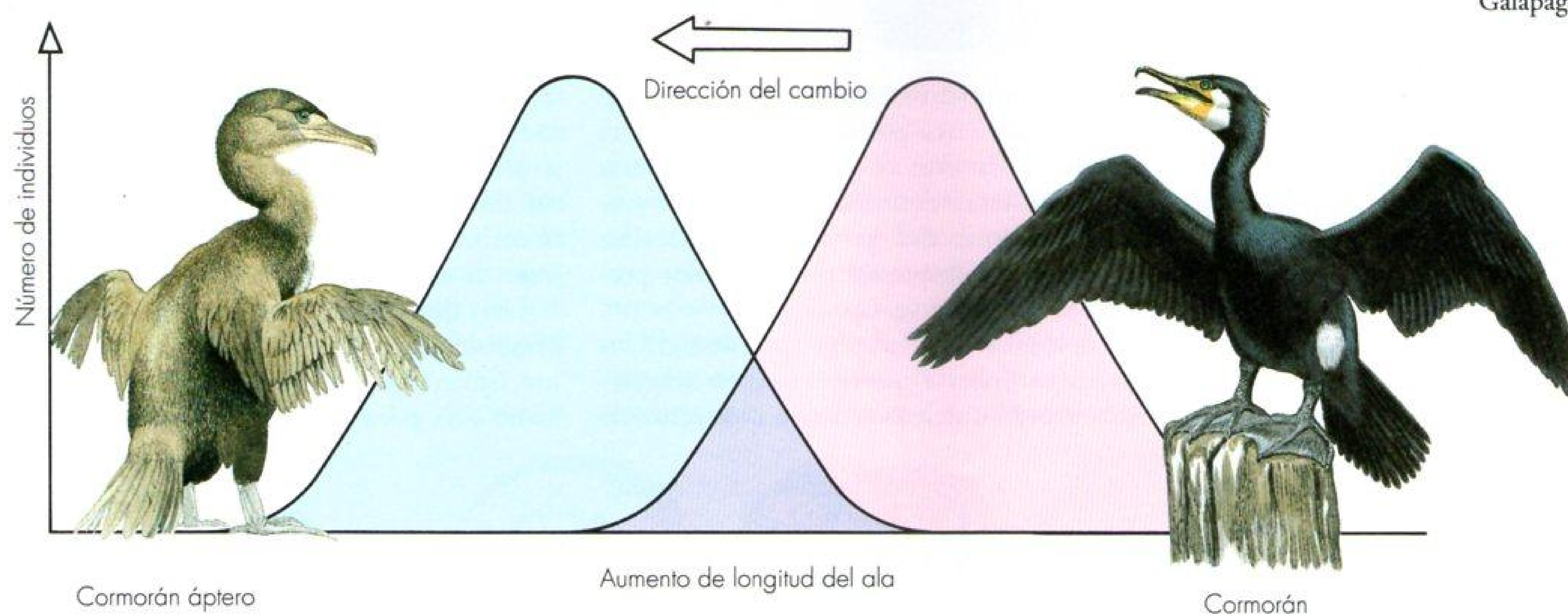
Una mutación que ocasionara el relleno de la cavidad con una sustancia gelatinosa daría lugar a una lente rudimentaria, que mejoraría la capacidad de formación de imágenes del ojo. Algunos anélidos marinos poseen ojos de este tipo. Una vez alcanzada esta fase, el proceso pudo continuar con la formación de una lente más densa y mejor conformada (el cristalino); de un diafragma o iris para controlar la entrada de luz; y, por último, de células receptoras muy precisas, con un gran poder de resolución y sensibilidad a diferentes colores.

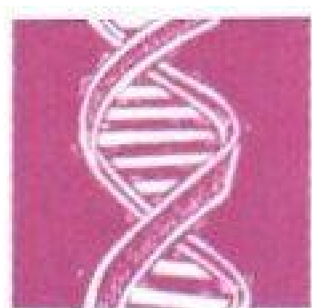


Los detalles exactos no tienen demasiada importancia. Lo importante es que un órgano complejo pudo evolucionar pasando por miles de formas intermedias, todas ellas funcionales y cada una con una ligera ventaja adaptativa sobre el diseño anterior. Esta conclusión disipa las dudas acerca del papel de la selección natural como mecanismo del cambio adaptativo.

El oso polar, otro habitante del Ártico, se ha visto sometido a las mismas presiones selectivas que el búho nival, adquiriendo también color blanco. Este camuflaje le proporciona unos segundos de ventaja al acercarse a presas como las focas.

El cormorán áptero, un ave marina de gran tamaño que atrapa peces bajo el agua, es el único miembro no volador de su familia. Al igual que otras aves que viven en islas apartadas, ha perdido la capacidad de volar. Como en las Galápagos no tiene depredadores naturales y existe un abundante suministro de pescado a poca distancia de la costa, esta pérdida no parece haberle perjudicado, e incluso podría considerarse beneficiosa, ya que le permite ahorrarse un enorme gasto de energía.
El esquema indica la dirección de la presión selectiva sobre la longitud de las alas, que debe haber actuado en la evolución del cormorán áptero de las Galápagos.





GENES Y VARIACIONES

«Cada cosa engendra a su semejante»: ésta sería la definición más sencilla de la reproducción en el seno de una especie. Sin embargo, resulta evidente que, aparte de los gemelos idénticos, los miembros de una especie no son todos iguales, y esto se debe a que, genéticamente, cada uno es un caso único. Los caracteres morfológicos generales de una especie, como el número y forma de sus extremidades, no varían, pero basta con examinar de cerca a los individuos para comprobar que existen diferencias entre unos y otros.

No resulta difícil apreciar estas variaciones individuales; hacemos uso de ellas cada vez que reconocemos a una persona conocida. De manera similar, en animales como los caracoles de tierra del género *Cepaea* se observan notables variaciones individuales de color y franjeado de la concha, dentro de una misma especie. En estos casos se dice que la especie presenta polimorfismo.

Para determinar el grado exacto de polimorfismo de una especie sería preciso leer las secuencias de ADN de su genoma. Por el momento, es posible obtener una idea bastante aproximada de la variación genética básica de una especie examinando las proteínas que resultan de la acción de sus genes.

Una técnica de laboratorio rápida y sencilla para diferenciar proteínas es la electroforesis en gel, que mide la carga neta, positiva o negativa, de una molécula de proteína. Cada proteína está formada por una secuencia concreta de aminoácidos, y cada uno de éstos posee su propia carga. Como cada proteína está formada por una combinación diferente de los 20 aminoácidos posibles, la carga neta total de cada una suele ser diferente. Basta una diferencia de un solo aminoácido entre una proteína y otra para que se produzca una alteración en la carga general.

Una ligera alteración en la secuencia de aminoácidos de una proteína no afecta negativamente a su función. Por el contrario, las pequeñas variaciones le dan variedad. La electroforesis permite determinar el número de formas que puede adoptar una proteína. No es un método tan exacto como descifrar las secuencias de aminoácidos de todas las variantes de una proteína, pero es mucho más rápido.

En los años sesenta, cuando se empezó a aplicar la electroforesis a proteínas humanas y de la mosca de la fruta se obtuvieron resultados sorprendentes. Entre la cuarta parte y la mitad de las proteínas examinadas resultaron ser polimórficas; y como es natural, cada una de sus posibles formas tenía que estar determinada por una versión diferente del gen responsable. La hemoglobina humana, por ejemplo, presenta más de cien variantes.

Lo lógico sería pensar que una de las variantes debería poseer «ventaja adaptativa» sobre las demás y, como consecuencia de la selección natural, acabaría siendo cada vez más común, hasta llegar a excluir a todas las demás. Pero este monomorfismo no siempre se da, y los mecanismos que mantienen la diversidad constituyen un tema de debate entre los evolucionistas.

Uno de los mecanismos que explican la persistencia de genes no óptimos es el polimorfismo equilibrado. Un gen que determine una proteína que no sea la óptima







Los caracoles de tierra de la especie *Cepaea nemoralis* presentan una increíble gama de variaciones individuales en cuanto a franjas y coloración de la concha. Pero a pesar de estas diferencias, que están determinadas genéticamente, todos estos caracoles son miembros de la misma especie. Ciertas variaciones pueden proporcionar a los caracoles una ventaja selectiva en un hábitat determinado. Por ejemplo, los caracoles con conchas de colores claros quedan mejor camuflados en terrenos arenosos, librándose de los ataques de los pájaros.



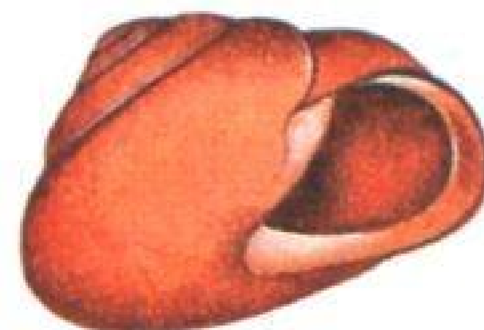
podría, no obstante, mantenerse en la población cuando su combinación con otro gen proporcionara una ventaja adaptativa clara. Por ejemplo, el gen humano que determina la anemia falciforme persiste en África, a pesar de sus efectos perjudiciales, porque los individuos que poseen un gen normal y otro mutante quedan protegidos contra la malaria.

Una segunda razón son las diferentes presiones selectivas que tienen lugar en distintas regiones y en diferentes épocas, con el resultado de que a la población nunca se le presenta una elección adaptativa segura entre las diferentes variantes, cada una de las cuales resulta ventajosa en determinadas situaciones.

El genetista japonés Kimura ha sugerido una tercera posibilidad. Su «teoría neutral» sostiene que, en términos de ventaja adap-

Todos los seres humanos pertenecen a la misma especie, pero dentro de dicha especie existen grandes variaciones. Como la especie se difundió por muchas zonas climáticas del planeta, en cada una se desarrollaron diferentes características, en aspectos como la pigmentación de la piel y la textura del cabello, que conferían ventajas selectivas en ciertas condiciones.













tativa, las diferentes variantes proteicas son neutrales; es decir, no hacen que los individuos que las poseen tengan más o menos éxito que los que poseen otras variantes. Esto podría explicar que existan tantas formas de una misma proteína, tanto simultánea como sucesivamente.

Sea lo que sea lo que mantiene el alto grado de polimorfismo que existe dentro de las especies, la variación en sí misma es algo más que la materia prima del cambio adaptativo: constituye el primer paso en una serie de diferenciaciones que desemboca en la formación de un nuevo tipo de organismo: una especie nueva.

Pero ¿qué es una especie? En lenguaje cotidiano, la palabra describe una forma particular de organismos vivos. Para los biólogos, y sobre todo para los evolucionistas, trazar la línea entre una especie y otra plantea enormes problemas. ¿Dónde están los límites de una especie, y cómo se forma una especie nueva?

Cuando dos organismos se distinguen claramente uno de otro, como sucede con un orangután y un chimpancé, resulta fácil afirmar que se trata de especies distintas. Es como si cada uno perteneciera a un grupo con fronteras bien delimitadas. El reconocimiento de estas fronteras parece estar muy generalizado. La tribu kalem de Nueva Guinea, por ejemplo, distingue y tiene nombres para 174 formas de vertebrados del bosque —reptiles, aves y mamíferos— y todos estos nombres, excepto cuatro, corresponden a especies científicamente definidas por los zoólogos.

Se podría decir que la especie es la única agrupación definible en términos absolutos —la única «natural»— en la jerarquía del sistema de clasificación *(ver recuadro)*. Esto se debe a que los organismos que constituyen una especie definen el grupo al que pertenece por su propia conducta observable.

Según el zoólogo evolutivo Ernst Mayr, «una especie es un conjunto de poblaciones potencialmente interfecundables, y aislado reproductivamente de otros conjuntos similares». En palabras más sencillas, esto significa que los miembros de una especie se pueden cruzar entre sí (y producir descendencia viable), pero no pueden cruzarse con miembros de otra especie. Así pues, la conducta reproductiva de los organismos define explícitamente los límites de una especie. Evidentemente, esta definición sólo se aplica a organismos que se reproducen sexualmente. En los organismos con reproducción asexual se pueden identificar tipos y llamarlos especies, pero no se puede aplicar estrictamente la definición de Mayr.

En la práctica, la conducta reproductiva es el factor fundamental que determina los límites de una especie. Pero los científicos utilizan además otros caracteres físicos que facilitan la identificación, como el número y la forma de los dientes de un animal o de los pétalos de una flor.

Decidir cuándo y cómo aparece una nueva especie presenta problemas aún mayores que los de definir una especie ya existente. La formación de especies nuevas, o especiación, puede implicar la transformación completa de una especie en otra (anagénesis) o la escisión de una especie en dos o más (cladogénesis). Sea cual sea la forma que adopte, la especiación es el resultado directo de cambios producidos en el fondo genético de una especie y, por tanto, en su polimorfismo genético (pp. 78-79).

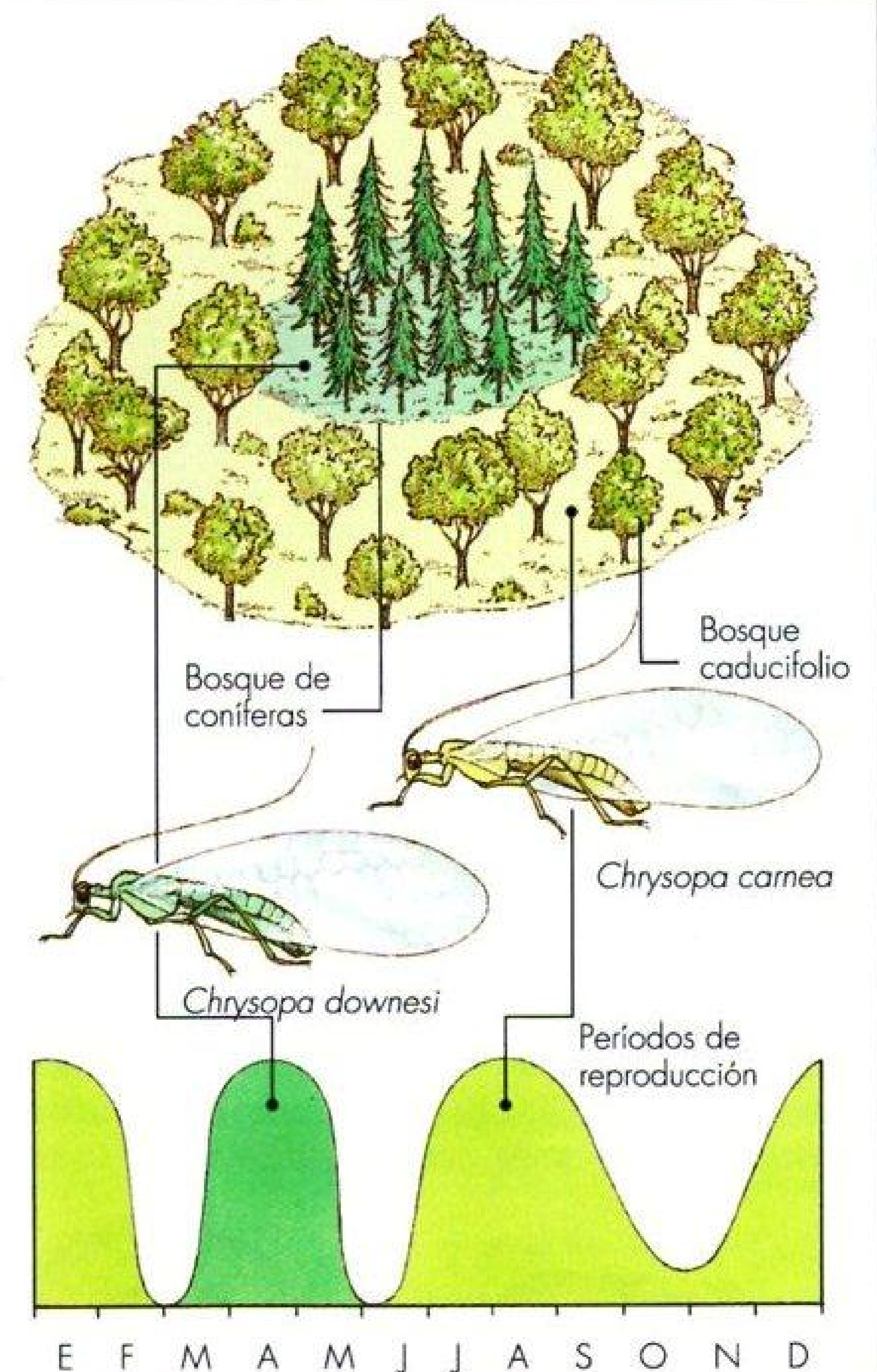
Cuando todas las poblaciones de una especie viven en la misma zona geográfica se dice que son simpátridas, lo cual quiere decir que se encuentran en continuo contacto unas con otras. En consecuencia, los genes pueden fluir con relativa facilidad a través del fondo genético común de la especie. Si en una población se produce una mutación beneficiosa de un gen, la adaptación resultante se puede difundir por selección natural a todo el fondo genético de la especie, al cabo de varias generaciones.

Cuando una especie presenta una continuidad genética de este tipo es difícil que se divida en varias especies diferentes. Las diferencias genéticas entre individuos de distintas poblaciones se diluyen por efecto de los cruzamientos y el flujo génico, reduciendo las posibilidades de especiación.

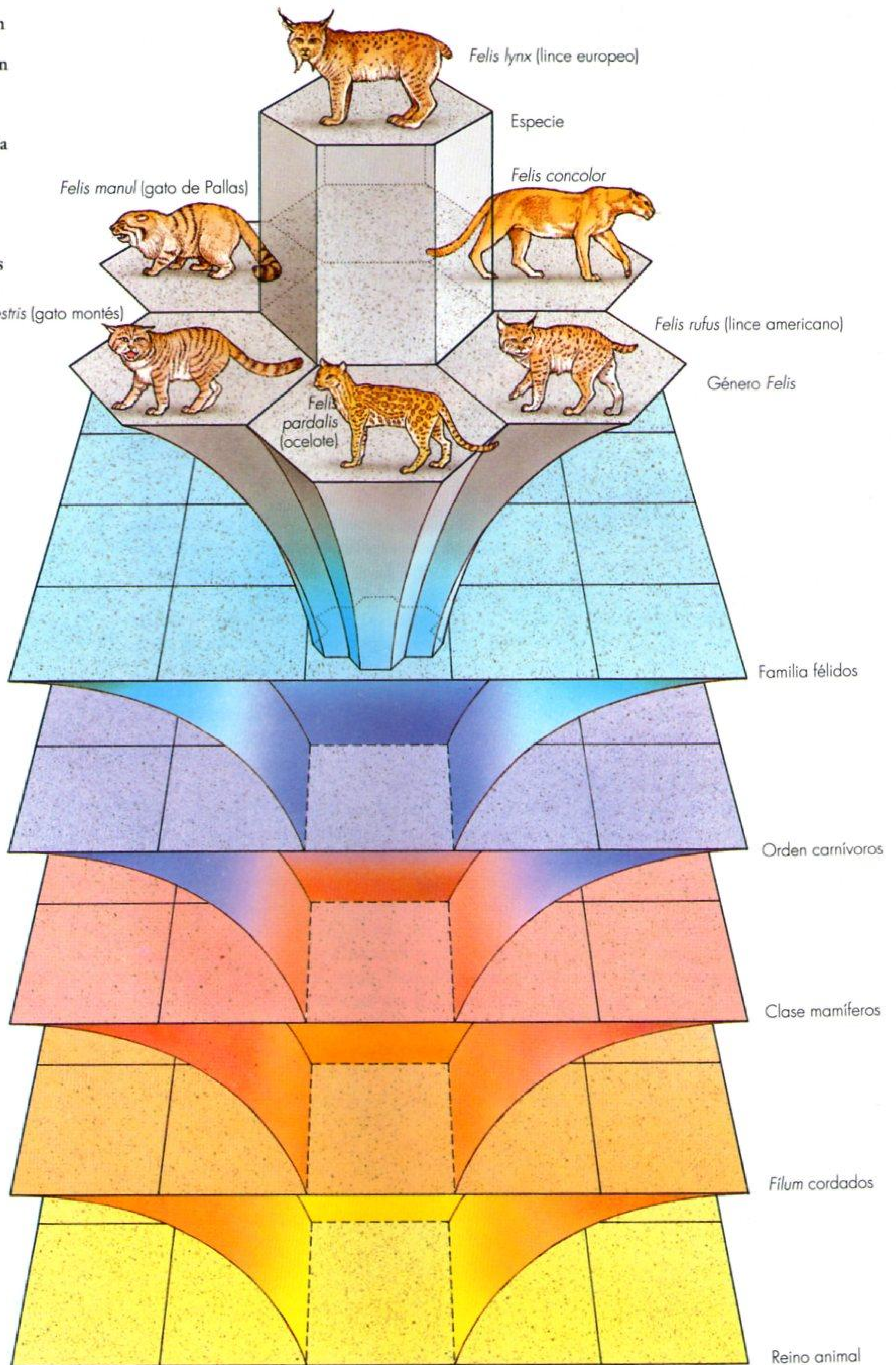
Sin embargo, sí que es posible que la especie se vaya transformando en otra. A lo largo de mucho tiempo, las adaptaciones de la especie pueden dar lugar a cambios tan acusados en las características físicas que ya no se pueda reconocer la especie y sea preciso asignarle un nuevo nombre. Esta modalidad de especiación no provoca rupturas en la continuidad genética, y el linaje de los miembros de la nueva especie se continúa sin interrupciones desde la especie que la precedió.

ESPECIES QUE SE ESCINDEN

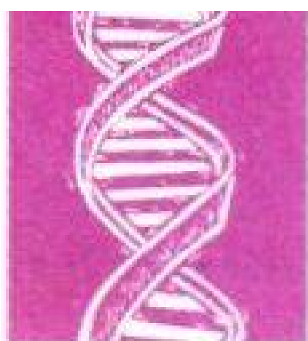
Puede ocurrir que una especie se divida en dos sin que exista separación geográfica entre poblaciones, como parece haber ocurrido con estas dos especies de crisopas. Sólo se diferencian en unos pocos genes, pero estas pequeñas variaciones genéticas tienen efectos muy pronunciados.
La especie *Chrysopa carnea* vive en bosques de hoja caduca y es de color verde claro en verano y pardo en invierno. La nueva especie, *Chrysopa downesi*, que desciende evidentemente de *C. carnea*, vive en bosques de coníferas y su color es verde oscuro durante todo el año. El factor diferenciador consiste en que cada una se reproduce en diferente época del año *(ver esquema)*, de manera que nunca tienen ocasión de entrecruzarse y el flujo génico entre ambas resulta imposible.



Una especie es un conjunto de organismos individuales que pueden cruzarse unos con otros. Cada especie se designa con un nombre en latín que consta de dos partes: la primera palabra es el nombre genérico (el del género al que pertenece el organismo) y la segunda el nombre específico, a veces descriptivo, que identifica a la especie concreta.
Las especies se agrupan en géneros, los géneros en familias, las familias en órdenes, los órdenes en clases, las clases en tipos o *fila* (singular: *filum*), y los *fila* en reinos, en una jerarquía de niveles cada vez más amplios.



Niveles de clasificación de una especie, el lince o *Felis lynx*:
Género: *Felis*; un grupo de especies similares a los gatos, que se distinguen por su conducta, hábitat y coloración.
Familia: Félidos; carnívoros con cinco dedos en las garras delanteras y cuatro en las traseras.
Orden: Carnívoros; mamíferos comedores de carne, como los perros, los gatos y los osos.
Clase: Mamíferos; animales de sangre caliente que alimentan a sus crías con leche producida en las glándulas mamarias de la madre.
Fílum: Cordados; animales con notocordio (precursor de la columna vertebral), por encima del cual discurre un cordón nervioso hueco.
Reino: Animalia; incluye todas las formas animales.



1 La diversidad de especies de cíclidos en los lagos africanos podría deberse a los cambios en el nivel del agua a lo largo de millones de años. La primera etapa de esta secuencia hipotética corresponde al nivel más alto, con el lago lleno y posibilidad de cruzamiento entre todas las poblaciones de una especie.

2

La escisión de una especie en varias, que forma parte fundamental de la dinámica de la evolución, es probablemente la principal manera en que se forman nuevas especies. Esta modalidad de especiación suele darse cuando las poblaciones de una especie se establecen en zonas geográficas diferentes. El proceso, denominado especiación alopátrica, tiene lugar cuando la aparición persistente de diferencias genéticas entre las poblaciones da como resultado la formación de subespecies geográficas, que acaban convirtiéndose en nuevas especies.

La idea básica es relativamente simple. En cualquier especie muy difundida, la variación genética local produce subespecies identificables, como pueden ser plantas con diferentes diseños en sus pétalos o aves con diferentes patrones de plumaje. Pero la especie en conjunto se mantiene intacta, debido al flujo génico entre las subespecies. Sin embargo, si una alteración climática, geográfica o geológica crea una barrera insuperable al intercruzamiento de estos grupos, se romperá la continuidad genética entre una población y las demás. El avance de los hielos, el cambio del curso de los ríos, el descenso del nivel de los lagos o mares, o la expansión de los desiertos, pueden crear barreras físicas que separen a las poblaciones. Las ilustraciones de estas páginas muestran las posibles consecuencias del descenso del nivel del agua en un lago.

Una vez aisladas, las dos poblaciones se desarrollarán genéticamente bajo la influencia de presiones selectivas independientes, provocadas por sus diferentes ambientes, y acabarán diferenciándose una de otra. Sin embargo, si al cabo de mucho tiempo desaparecen los cambios que provocaron el aislamiento, las dos poblaciones pueden volver a encontrarse y cruzarse. En estos casos pueden darse tres resultados evolutivos.

En primer lugar, es posible que la divergencia no haya sido lo bastante grande como para impedir los cruzamientos mixtos ni para reducir significativamente la viabilidad de los híbridos. En este caso, las dos poblaciones se volverán a fundir en una sola especie y se reanudará el flujo génico.

Otra posibilidad es que la divergencia sea ya lo bastante acusada como para impedir los cruzamientos viables. Puede producirse, por ejemplo, un aislamiento ecológico entre dos poblaciones. Si se trata de plantas, es posible que florezcan en diferentes épocas o que sean polinizadas por diferentes insectos. En el caso de animales, pueden presentar diferencias en los rituales de galanteo o de identificación de pareja. La inexistencia de flujo génico entre las poblaciones obliga a considerarlas como especies distintas. Es posible que coexistan, pero también es posible que una tenga más éxito que la otra y que esta última se extinga.

También puede darse una situación intermedia como consecuencia del reencuentro y muchos evolucionistas opinan que éste es un caso muy común. Por lo general, esta situación conduce a la consolidación de los nuevos e incipientes grupos específicos.

En este caso, la diferenciación genética en aislamiento ha producido algunos cambios, pero no los suficientes para impedir todos los cruzamientos mixtos. Si la descendencia de los cruzamientos endógamos tiene más éxito que la de los cruzamientos mixtos —en términos de supervivencia y fertilidad—, la presión selectiva actuará en contra de estos últimos.

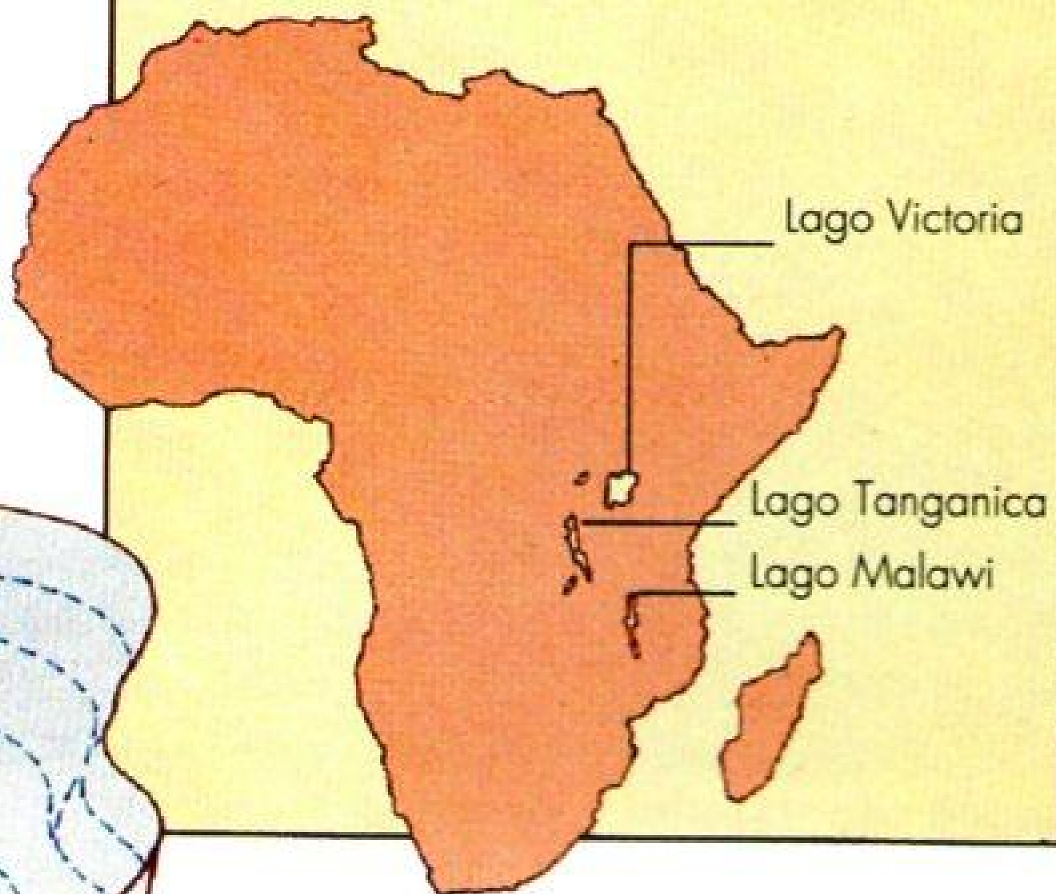
Las especies muy próximas, sobre todo si proceden de una diferenciación reciente (las llamadas «especies hermanas»), pueden parecer muy semejantes, pero poseen algunas características fundamentales que impiden la hibridación. En Gran Bretaña, por ejemplo, las tres especies de mosquiteros —el mosquitero común, el mosquitero musical y el mosquitero silbador— son muy similares en tamaño y plumaje.

Sin embargo, estas especies hermanas ejecutan cantos muy diferentes en la época de apareamiento, y como el reconocimiento del canto constituye un factor clave para el emparejamiento de machos y hembras, la diferencia de sus cantos hace casi imposible el cruzamiento entre especies. Mediante estos mecanismos de aislamiento, las diferencias incipientes se van consolidando, ya que no existe flujo génico entre las poblaciones.

2 Si el nivel del lago desciende, las poblaciones locales de una especie pueden quedar aisladas unas de otras, y cada una se adaptará a sus condiciones concretas, diferenciándose genéticamente de las demás poblaciones.

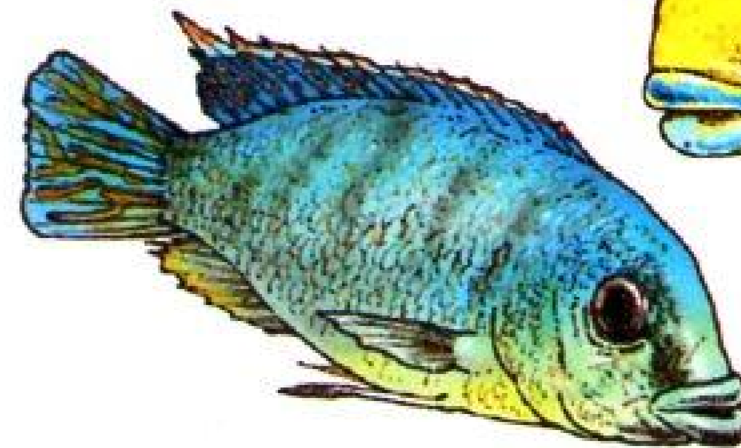
LAGOS AFRICANOS

Los tres grandes lagos de África —el Victoria, el Tanganica y el Malawi— contienen un número mayor de especies de peces que ningún otro sistema de lagos del mundo. Tan sólo en el lago Malawi existen 200 especies de peces cíclidos.

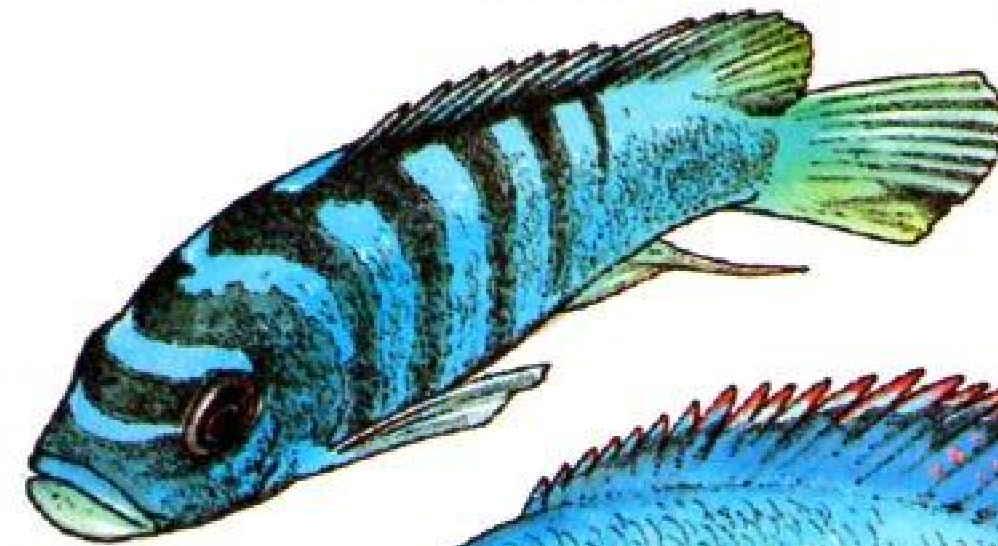




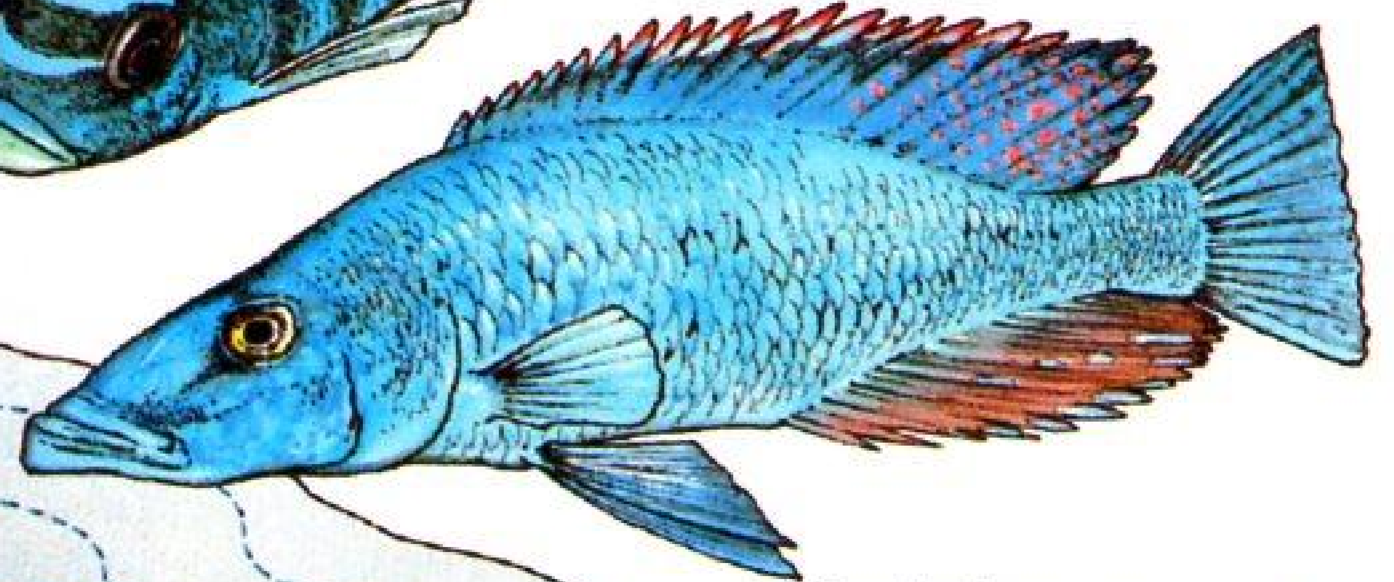
Aulonocara baenschi
Se alimenta de pequeños invertebrados arenícolas



Protomelas ornatus
Depredador



Pseudotropheus sp.
Se alimenta de algas



Dimidiochromis compressiceps
Depredador

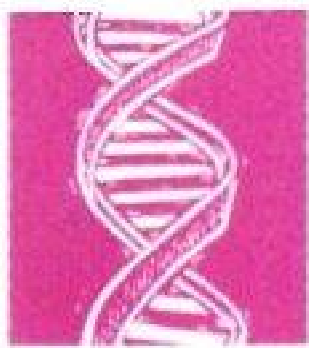
3

3 Cuando el nivel del agua vuelve a subir, algunas poblaciones vuelven a entrar en contacto; pero si ya se han desarrollao suficientes diferencias genéticas, el cruzamiento entre ellas resultará imposible. Se han convertido en especies diferentes.

4

4 Cuando el lago se llena de nuevo, coexisten en él muchas nuevas especies, formadas a partir de las poblaciones que quedaron aisladas.

Si las poblaciones de una especie quedan aisladas y continúan evolucionando por separado, acabarán convirtiéndose en especies diferentes. Las especies de peces cíclidos africanos presentan enormes variaciones de tamaño, dentición, forma de la boca y manera de alimentarse.



CAMBIOS DE NIVEL SUPERIOR

La evolución es como una grandiosa película épica con millones de figurantes. Los organismos pasados y presentes desempeñan sus papeles en una larga historia que narra la creación de nuevas especies. Sin embargo, se trata de una película sin guión; la evolución ha estado improvisando durante 4.000 millones de años.

Los organismos se clasifican en especies, géneros, familias, órdenes, clases y tipos (*filum*), según sus características comunes. Cada uno de estos agrupamientos, o taxones, incluye más formas que los de grado inferior y se define por características cada vez más generales. Cada nivel de esta clasificación, de esta jerarquía de diferencias entre los organismos, señala una fase en la continua creación de nuevas especies dentro de cada grupo particular. En otras palabras, representa un momento de la evolución en el que quedó establecido un conjunto significativo de cambios.

Las principales diferencias de diseño corporal que distinguen un *filum* de otro —por ejemplo, los artrópodos y los cordados— son manifestaciones de cambios que quedaron establecidos en un remoto pasado. El registro fósil deja claro que la mayoría de los tipos de invertebrados que existen en la actualidad ya existían a finales del Cámbrico, hace unos 500 millones de años, y probablemente antes.

Los mares del Cámbrico engendraron una enorme variedad de animales eucariontes con diferentes modelos corporales, que se pueden clasificar en *filums:* celentéreos, anélidos, moluscos, equinodermos, priapuloideos, braquiópodos, artrópodos y probablemente otros muchos, incluyendo cordados sin vértebras.

Como esta diferenciación tuvo lugar hace muchísimo tiempo, no resulta fácil desentrañar el verdadero origen de cada fílum. El estudio del ADN de sus representantes actuales puede proporcionarnos algunas pistas, pero gran parte de nuestras descripciones de esta fase crucial de la historia evolutiva se basan más en especulaciones fundadas que en hechos comprobados.

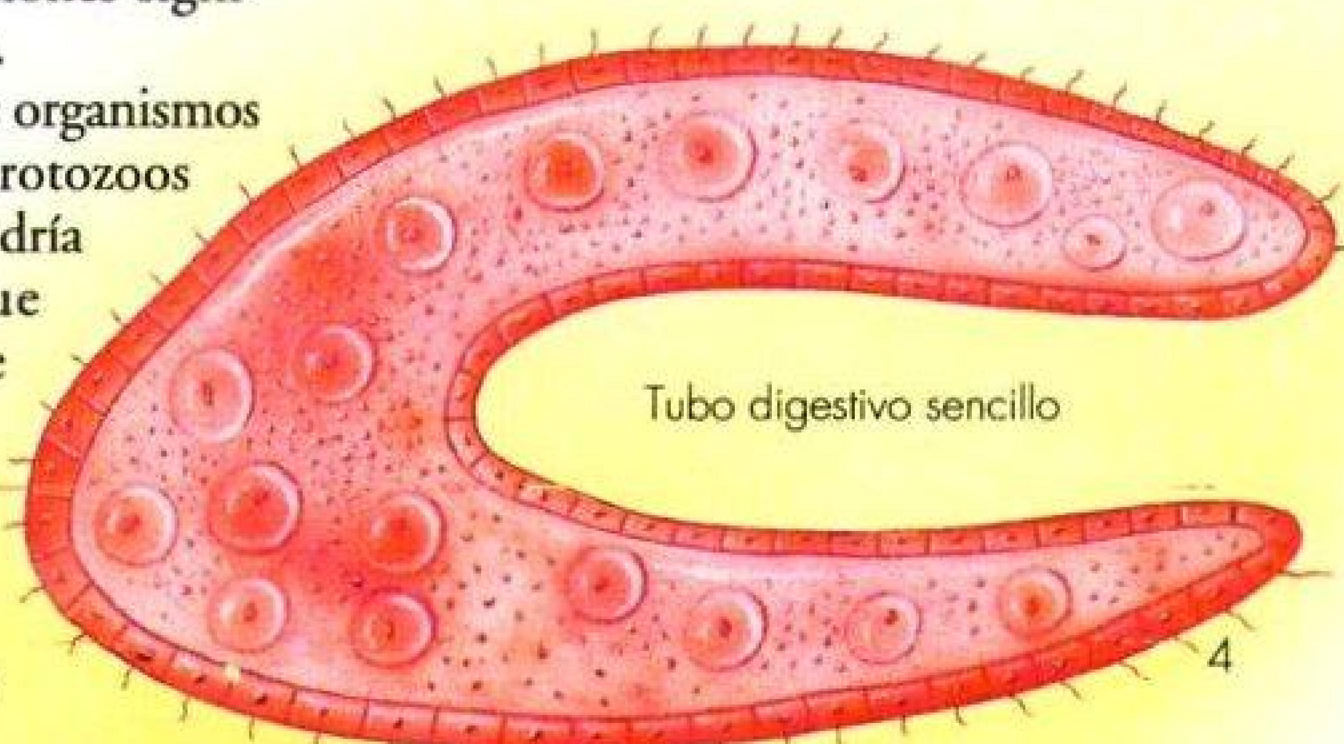
La primera pregunta clave que hay que responder es cómo evolucionaron los organismos unicelulares eucarióticos para transformarse en invertebrados pluricelulares mucho más complejos. Este cambio pudo tener lugar mediante una serie de transformaciones a pequeña escala, cuya acumulación acabó por producir alteraciones significativas en el diseño del cuerpo.

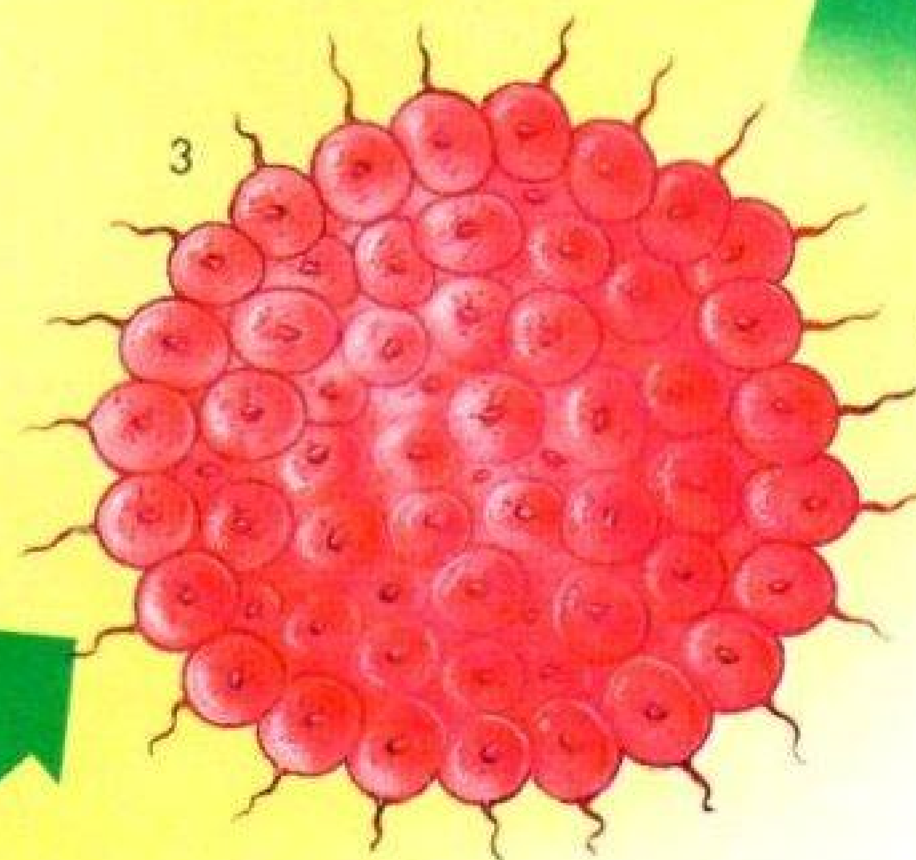
Supongamos que uno de estos organismos unicelulares viviera como los protozoos modernos. El primer cambio tendría que deberse a mutaciones que impidieran que las células hijas se separaran después de la mitosis.

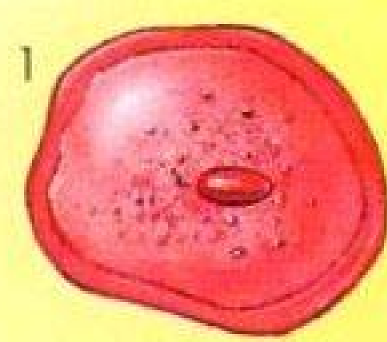
Posiblemente, dichas mutaciones activarían una o dos proteínas de la membrana celular que pegarían entre sí las superficies de las células hijas. Después de muchas divisiones, se habría formado una masa —o una lámina bidimensional— de células genéticamente idénticas.

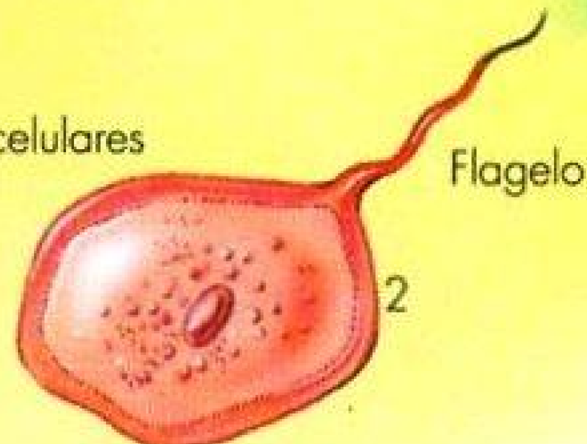
Las regiones interna y externa de la masa celular se encontrarían en condiciones ambientales ligeramente diferentes (por ejemplo, habría más oxígeno disponible en la superficie que en la parte interior). Esta variación de estímulos podría provocar la activación o represión de determinados genes en algunas células, aunque todas son genéticamente idénticas. La consecuencia podría ser, por ejemplo, que las células de la superficie tuvieran cilios o flagelos dirigidos hacia el exterior, y las células interiores no. En este caso, se habría producido un cambio significativo en el diseño del cuerpo. Esta es la denominada estructura de plánula, llamada así en alusión a un tipo de larvas de celentéreos.

Algunos invertebrados actuales de





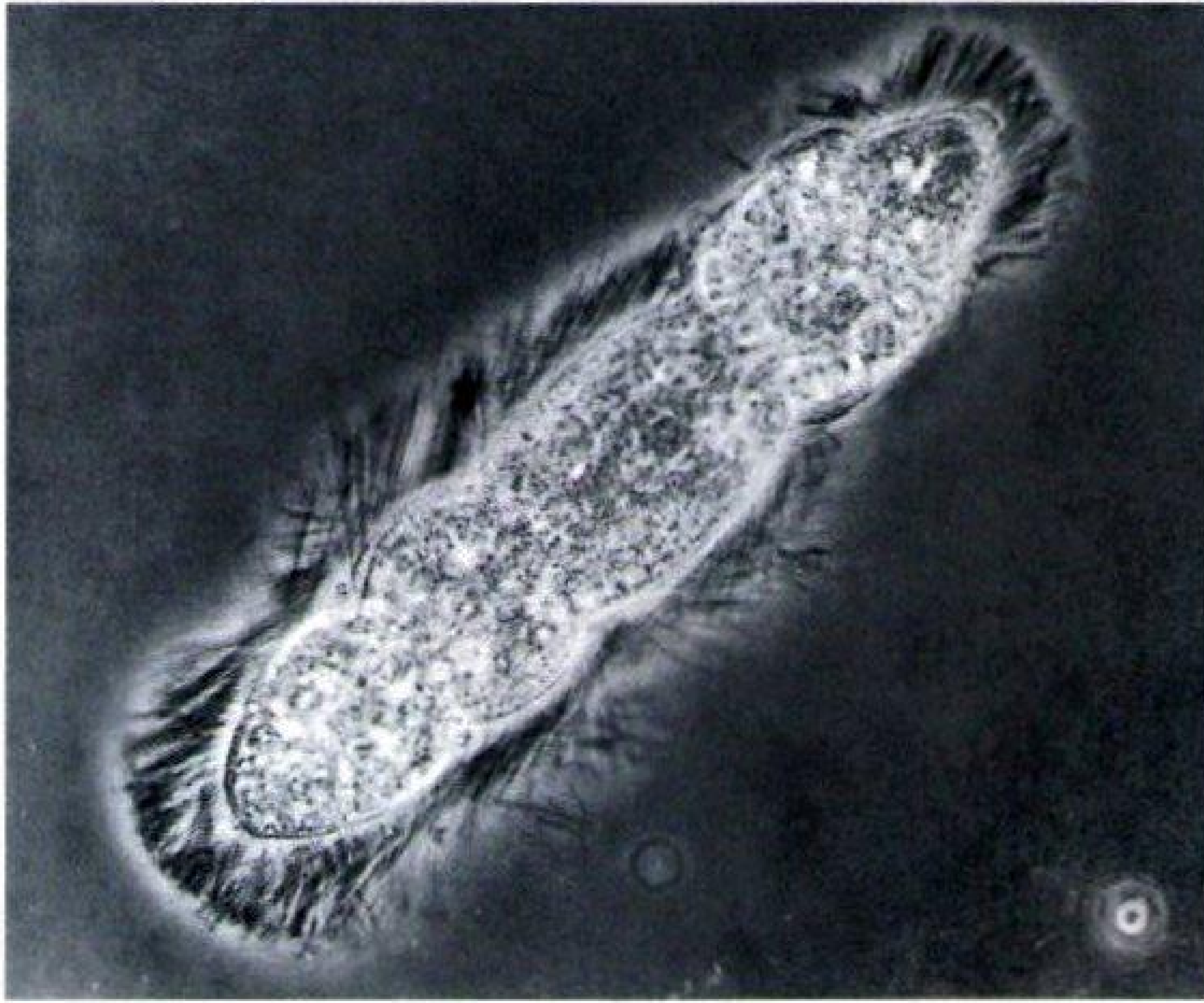




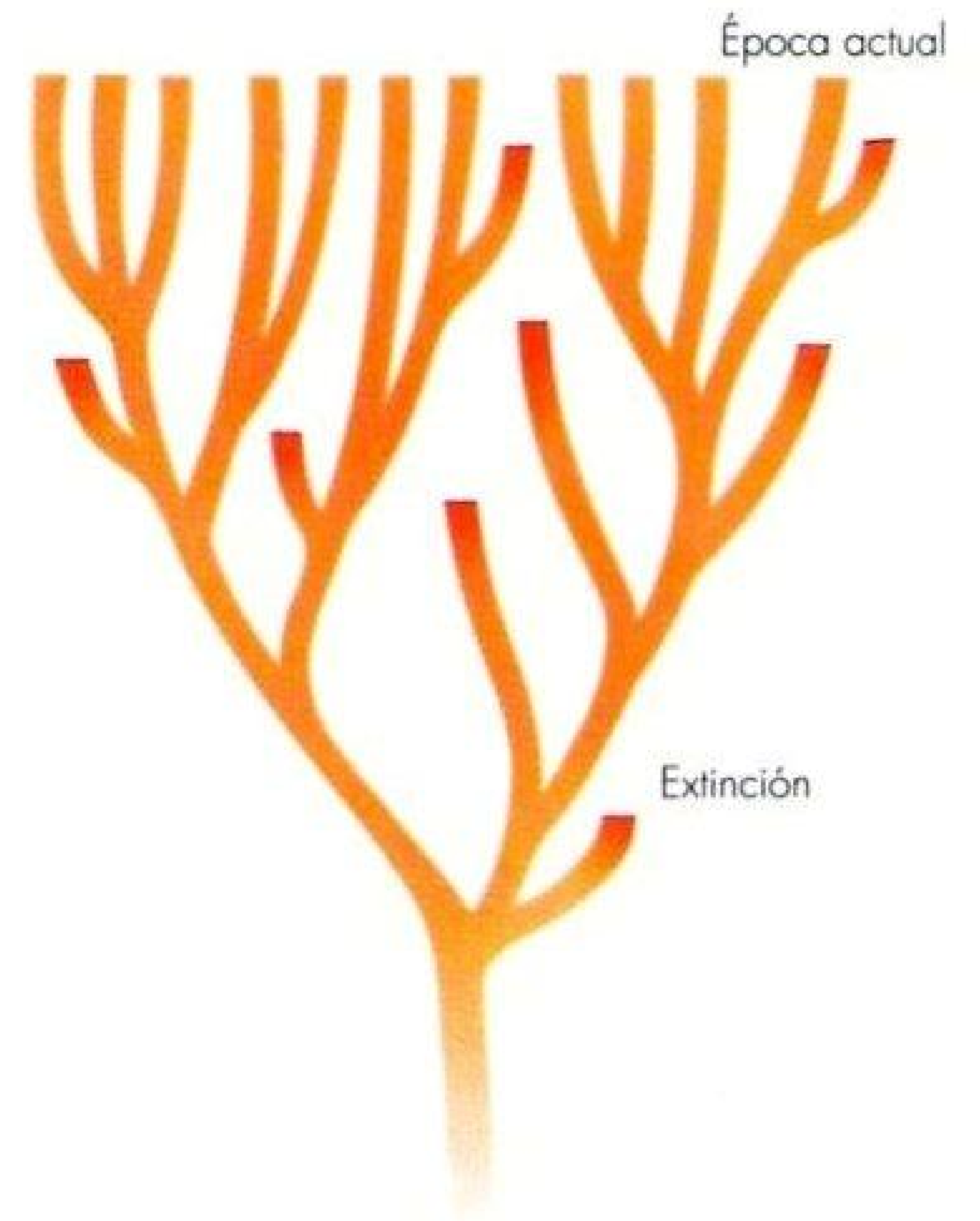
Se supone que los animales pluricelulares descienden de antepasados unicelulares ameboides (1) o flagelados (2). A finales del Precámbrico debieron surgir varias líneas de desarollo multicelular, a partir de células que se dividían sin que las hijas se separasen, formando así acúmulos celulares.

Probablemente, los acúmulos más sencillos eran macizos, con células flageladas en el exterior y sin flagelos en el interior (3). Todavía existen formas animales con esta estructura, como los placozoos y los mesozoos (*arriba izquierda*), y la larva plánula de los celentéreos.

El siguiente paso fundamental del desarrollo fue la invaginación de la superficie externa para formar una cavidad intestinal sencilla, sin ano (4). Probablemente, esta estructura, similar a la de los actuales platelmintos, dio origen a todos los otros tipos de invertebrados.



Estos dos mesozoos de sexo masculino son animales simples, sin intestino, sistema circulatorio, músculos ni sistema nervioso, que viven como parásitos en el interior de una ofiura. Sus cuerpos son masas celulares macizas, con flagelos en las células de la capa exterior.



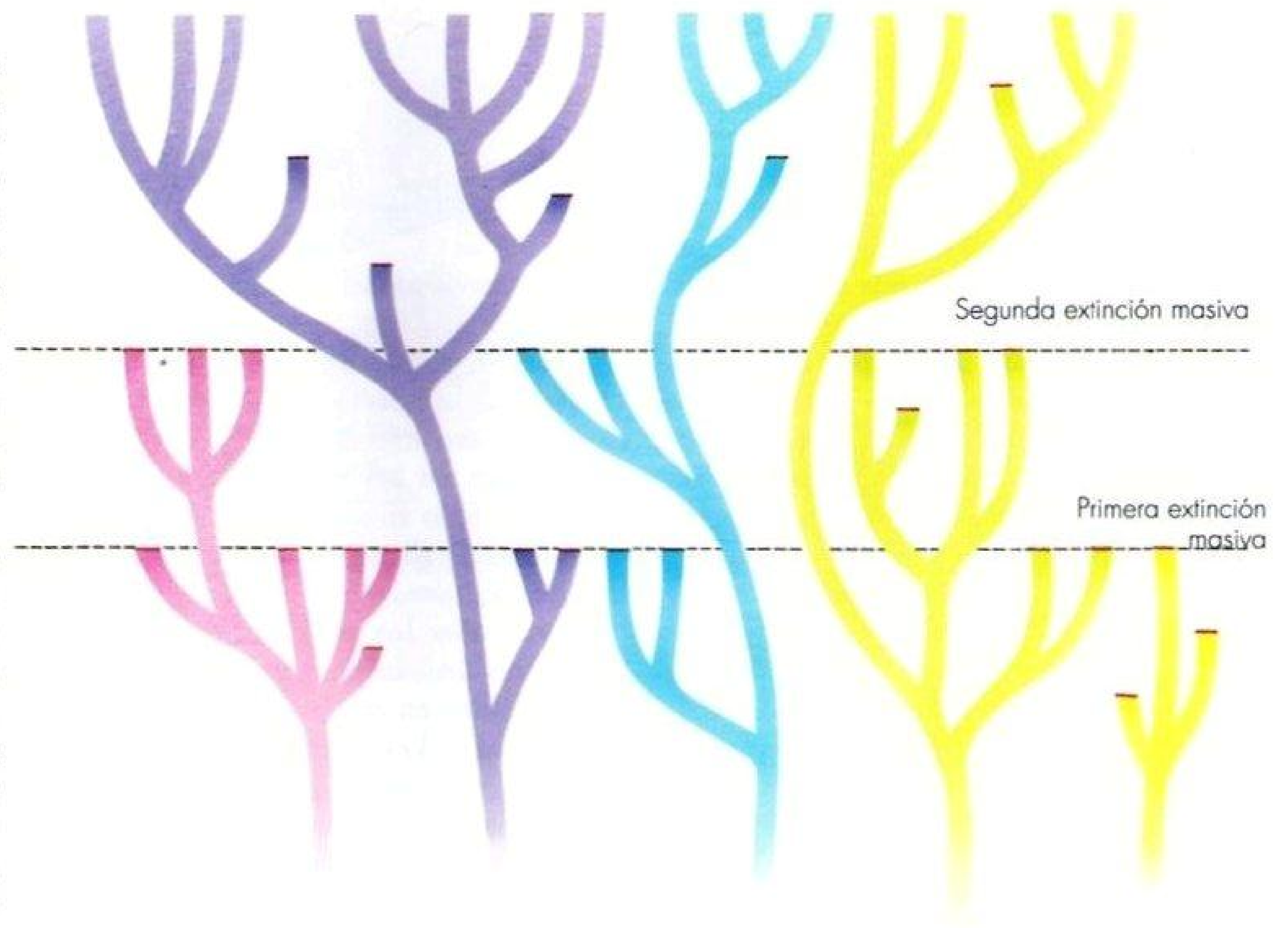
pequeño tamaño presentan estructura de plánula: carecen de sistemas nervioso, circulatorio y digestivo, y sólo poseen una capa exterior de células ciliadas o flageladas, y otra capa interior de células sin cilios ni flagelos. Esta estructura la presentan los placozoos, que son animales de vida libre, y los mesozoos, que son parásitos *(ver ilustración superior).*

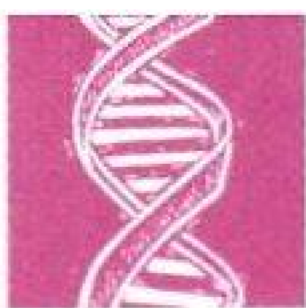
A continuación, sólo se necesitaría una mutación importante para transformar la masa celular diferenciada en un organismo semejante a un platelminto. En su forma más simple, este diseño consiste en que la superficie de la masa se invagina, hundiéndose por el centro y formando una especie de saco, cuya cavidad sirve de tubo digestivo. Esta forma ancestral tiene gran importancia, ya que, según muchos evolucionistas, pudo ser el tronco del que se derivaron otros muchos tipos de invertebrados más complejos.•

Cada una de las mutaciones de la serie que transformó la célula aislada en un organismo semejante a un platelminto tuvo que tener ventajas selectivas en los competitivos ambientes del Precámbrico. Es imposible saber cuáles eran aquellas ventajas. Puede que los grandes grupos de células fueran capaces de englobar partículas alimenticias más grandes, o que la superficie ciliada facilitara la locomoción y el acceso a nuevas fuentes de alimentos; casi con seguridad, la invaginación del cuerpo facilitó la captura y digestión de

Dado el carácter incompleto del registro fósil, no resulta fácil reconstruir la «forma» del árbol evolutivo. Sin embargo, a partir del material disponible, hay quien deduce que se trata de un «cono de diversidad", con una variedad de formas cada vez mayor que surge de unos comienzos limitados (*arriba*). Esta diversificación se ha prolongado a pesar de las extinciones producidas de vez en cuando.

Una teoría más completa sostiene que durante un considerable período de tiempo ha surgido una gran diversidad de organismos a partir de varios puntos de origen (*abajo*). En este esquema «podado», las extinciones masivas eliminan periódicamente una gran proporción de los organismos existentes, dejando que los restantes se vuelvan a diversificar.





VARIACIONES EN EL DISEÑO DEL CUERPO

Un principio fundamental de la evolución es la capacidad de generar nuevos diseños a partir de componentes ya existentes.

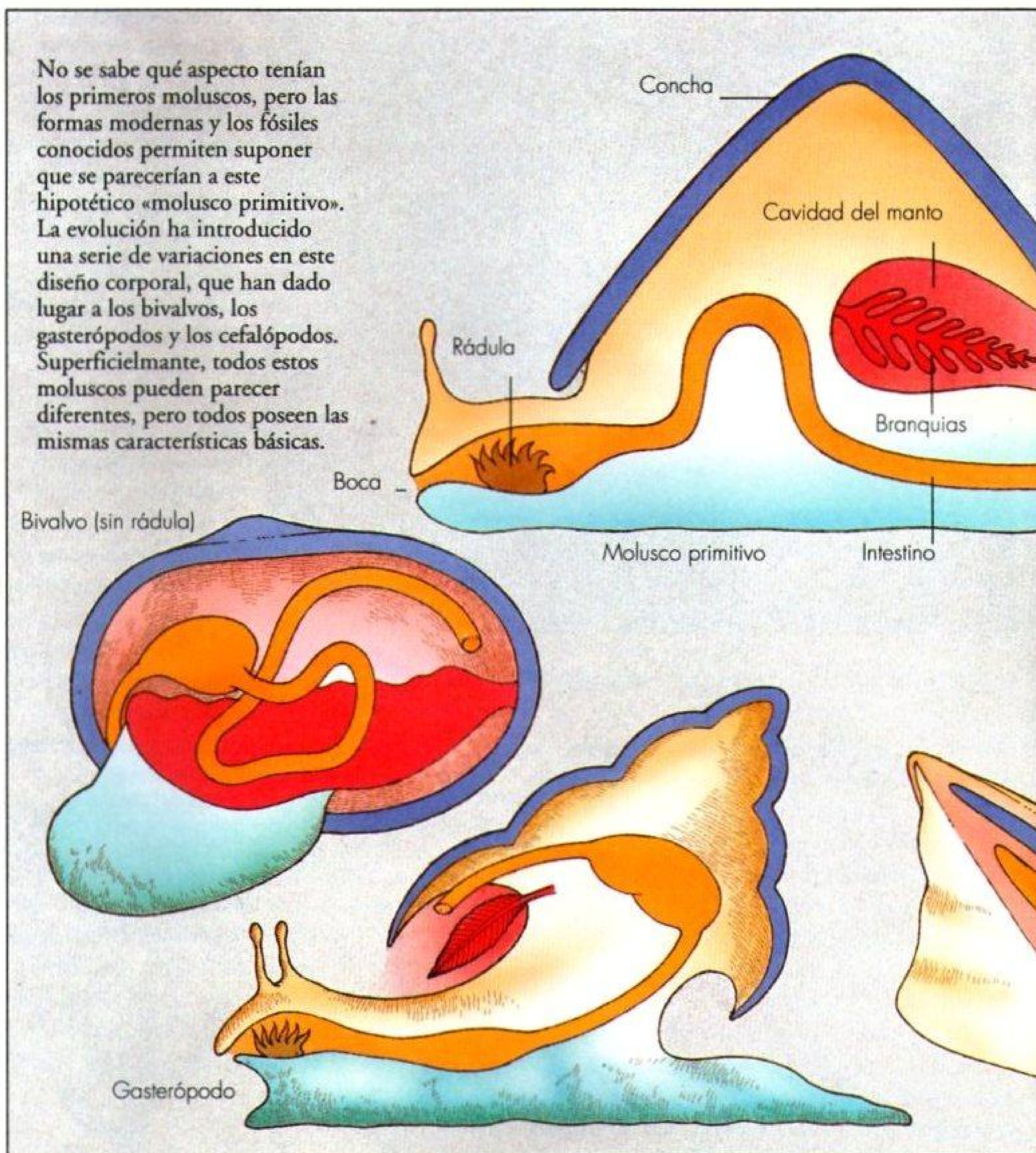
Las características de diseño que tipifican un *filum* suelen ser comunes a organismos muy diversos, que no sólo parecen muy distintos sino que tienen modos de vida diferentes. En casos extremos, la selección puede provocar el abandono de algunas de dichas características. Así pues, para los cambios evolutivos no existe ningún rasgo identificador sagrado: todo es modificable. Los moluscos sin concha y las aves no voladoras dan testimonio de ello.

Los moluscos constituyen un antiguo *filum* de invertebrados pluricelulares de cuerpo blando. En los estratos rocosos de principios del Cámbrico se han encontrado conchas fósiles que pertenecen sin duda alguna a este grupo. Así pues, sus verdaderos orígenes deben buscarse a finales del Precámbrico.

Los miembros del *filum* moluscos presentan una extraordinaria diversidad de formas que al profano pueden parecerle completamente diferentes. Este *filum* incluye a los bivalvos (como las almejas, ostras y mejillones), los gasterópodos (caracoles, babosas y lapas) y los cefalópodos (pulpos, calamares y los ya extinguidos ammonites y nautiloideos).

Todos estos grupos parecen muy diferentes unos de otros, y resulta difícil imaginar que un estático mejillón, encerrado en su concha y sujeto a las rocas por las fibras del biso, pertenezca al mismo *filum* que un calamar aerodinámico, rápido e inteligente. La diversidad total se hace aún más llamativa si consideramos los grupos de moluscos menos conocidos, como los escafópodos de concha larga y cónica, los quitones con ocho placas (poliplacóforos), los monoplacóforos semejantes a lapas y los aplacóforos, que parecen gusanos.

Pero a pesar de esta evidente variación, el examen a fondo revela que las principales pautas de cambio evolutivo se basan en alteraciones de un mismo diseño corporal. Este diseño, que probablemente derivó de antepasados semejantes a platelmintos (pp. 84-85), incluye un intestino que atraviesa el cuerpo de parte a parte, con boca y ano, la ausencia de segmentación en el cuerpo, la concha calcárea, un órgano raspador para comer que parece una lima y se llama rádula y un espacio en forma de



No se sabe qué aspecto tenían los primeros moluscos, pero las formas modernas y los fósiles conocidos permiten suponer que se parecerían a este hipotético «molusco primitivo». La evolución ha introducido una serie de variaciones en este diseño corporal, que han dado lugar a los bivalvos, los gasterópodos y los cefalópodos. Superficielmante, todos estos moluscos pueden parecer diferentes, pero todos poseen las mismas características básicas.

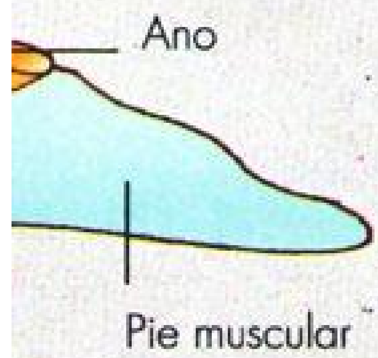
bolsa (la cavidad del manto) que contiene las branquias.

A lo largo de la evolución ha ido variando la importancia de los principales elementos estructurales, que se acentuaban o reducían en los diferentes grupos de moluscos. Sólo en unos pocos casos se han perdido estos elementos o sus equivalentes funcionales.

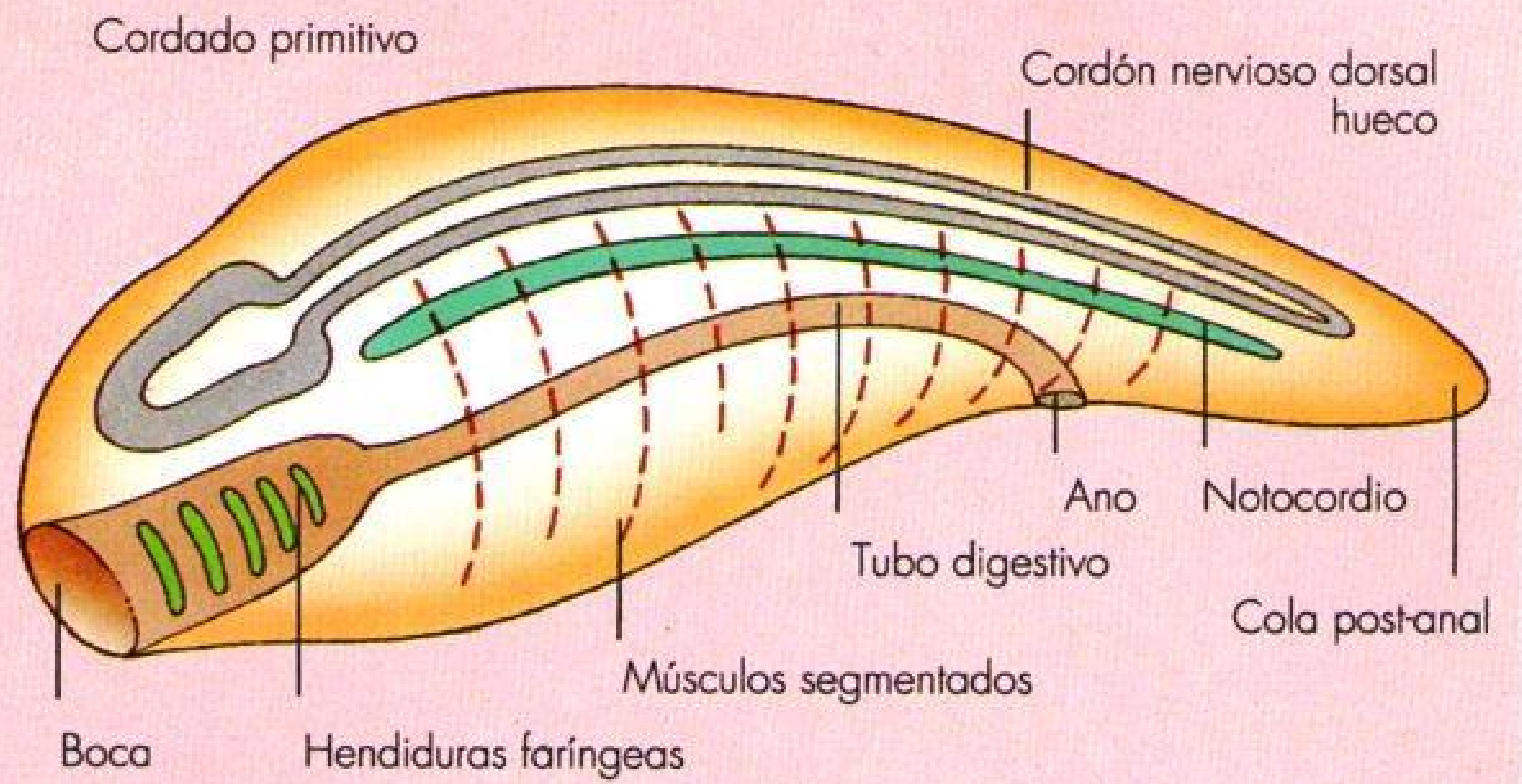
Casi todos los moluscos utilizan las branquias únicamente para obtener oxígeno disuelto en el agua. Sin embargo, los bivalvos las utilizan también para filtrar alimentos. Este cambio permitió a los bivalvos ocupar nuevos nichos y aprovechar fuentes de alimento inaccesibles para otros moluscos.

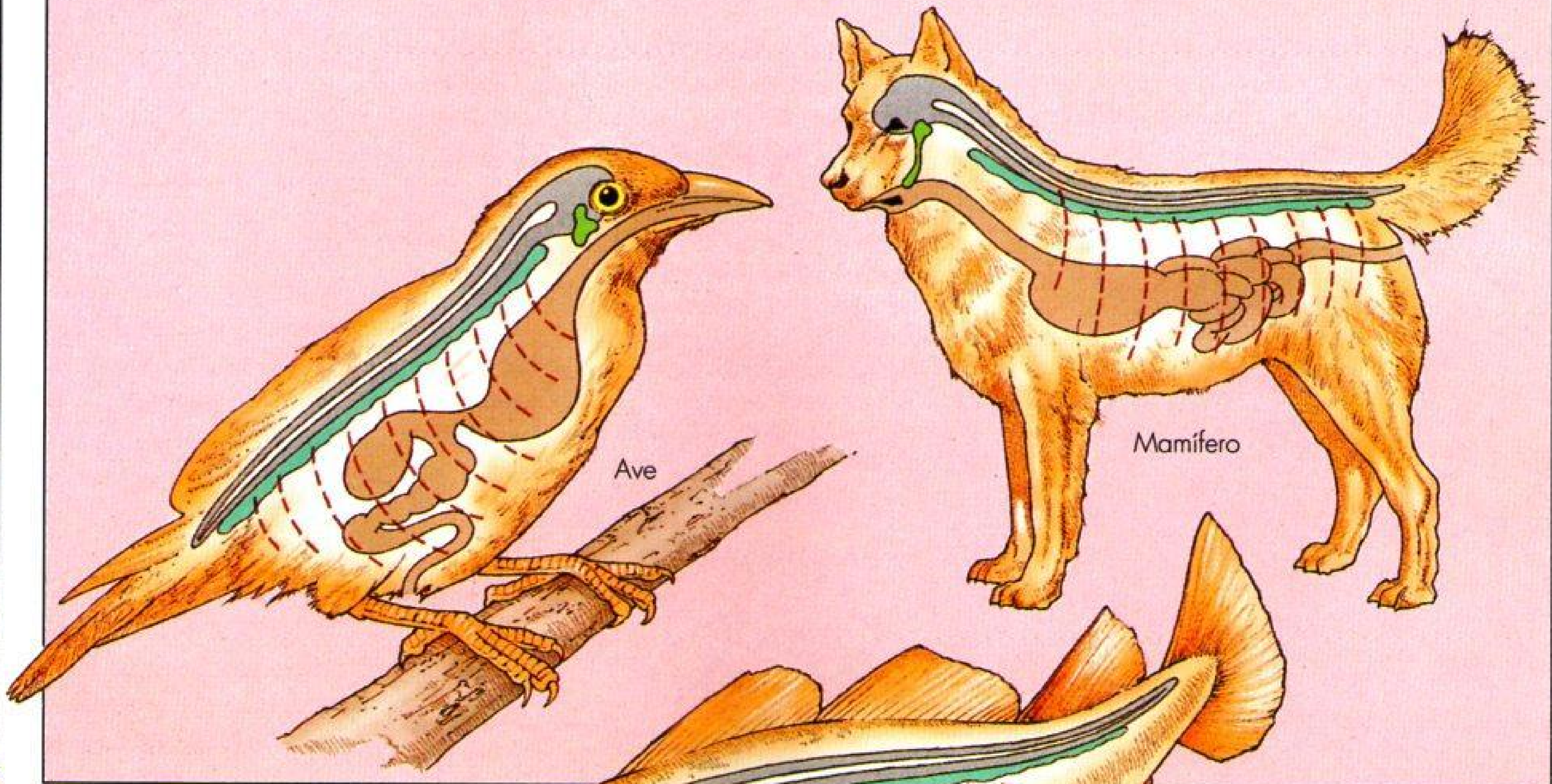
El *filum* de los cordados, al que pertenecemos los seres humanos, presenta aún más variaciones adaptativas que el de los moluscos. El cuerpo básico de un cordado está segmentado; a lo largo del dorso discurre un cordón nervioso hueco; el intestino anterior presenta orificios o ranuras (las hendiduras faríngeas) que comunican con el mundo exterior; y el cuerpo está recorrido por una estructura de sostén llamada notocordio.

El notocordio debió ser el principal soporte esquelético de los primeros vertebrados nadadores, y ha conservado esta función en las ascidias y anfioxos (pp. 88-89). Sin embargo, en los peces sin mandíbulas, como las lampreas, la función esquelética corre a cargo de engrosamientos cartilaginosos que rodean el notocordio y el cordón nervioso, y que son precursores de las vértebras. En los vertebrados —peces, anfibios, reptiles, aves y mamíferos—, el notocordio es un mero vestigio



'Las características básicas del diseño corporal de los cordados se aprecian en su forma más simple en las larvas de las ascidias y en los anfioxos (pp. 88-89). La ilustración representa un hipotético cordado primitivo, que combina todas las características típicas, indicando las modificaciones sufridas por los órganos en tres de las clases del *filum* cordados: peces, aves y mamíferos.



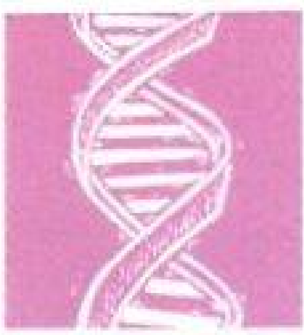






embrionario, y su función de sostén ha sido asumida por vértebras cartilaginosas u óseas.

Las ascidias, los anfioxos, los peces agnatos como las lampreas y los peces con mandíbulas son todos cordados acuáticos que utilizan las hendiduras faríngeas como branquias. Pero en los anfibios, reptiles, aves y mamíferos, las estructuras correspondientes a las hendiduras branquiales han adoptado otras funciones. Por ejemplo, la trompa de Eustaquio, que en los mamíferos comunica el oído medio con la garganta y permite equilibrar la presión, se deriva directamente de una hendidura branquial.



LAS GRANDES TRANSFORMACIONES



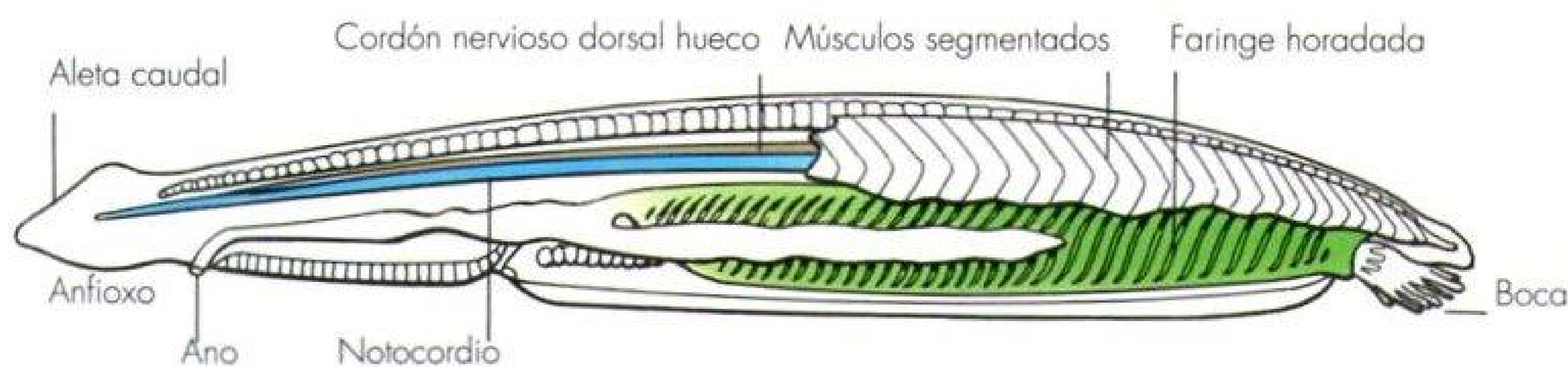
Ganglio nervioso
Faringe horadada
Tunicado adulto
Cordón nervioso dorsal hueco
Faringe horadada
Notocordio
Larva de tunicado

Las ascidias o tunicados (*arriba y abajo*) son animales marinos filtradores que pasan su fase adulta fijos a las rocas. Son cordados, miembros del mismo *filum* que los vertebrados, pero sus características de cordado sólo se aprecian plenamente en las larvas móviles, que parecen renacuajos. Cuando las larvas se establecen para convertirse en adultos, pierden órganos como el notocordio, y su cordón nervioso se reduce a un pequeño ganglio. Los únicos indicios de su origen cordado son las hendiduras en la pared faríngea, que sirven para alimentarse por filtración. Los primitivos cordados debieron parecerse a estas larvas de ascidia.

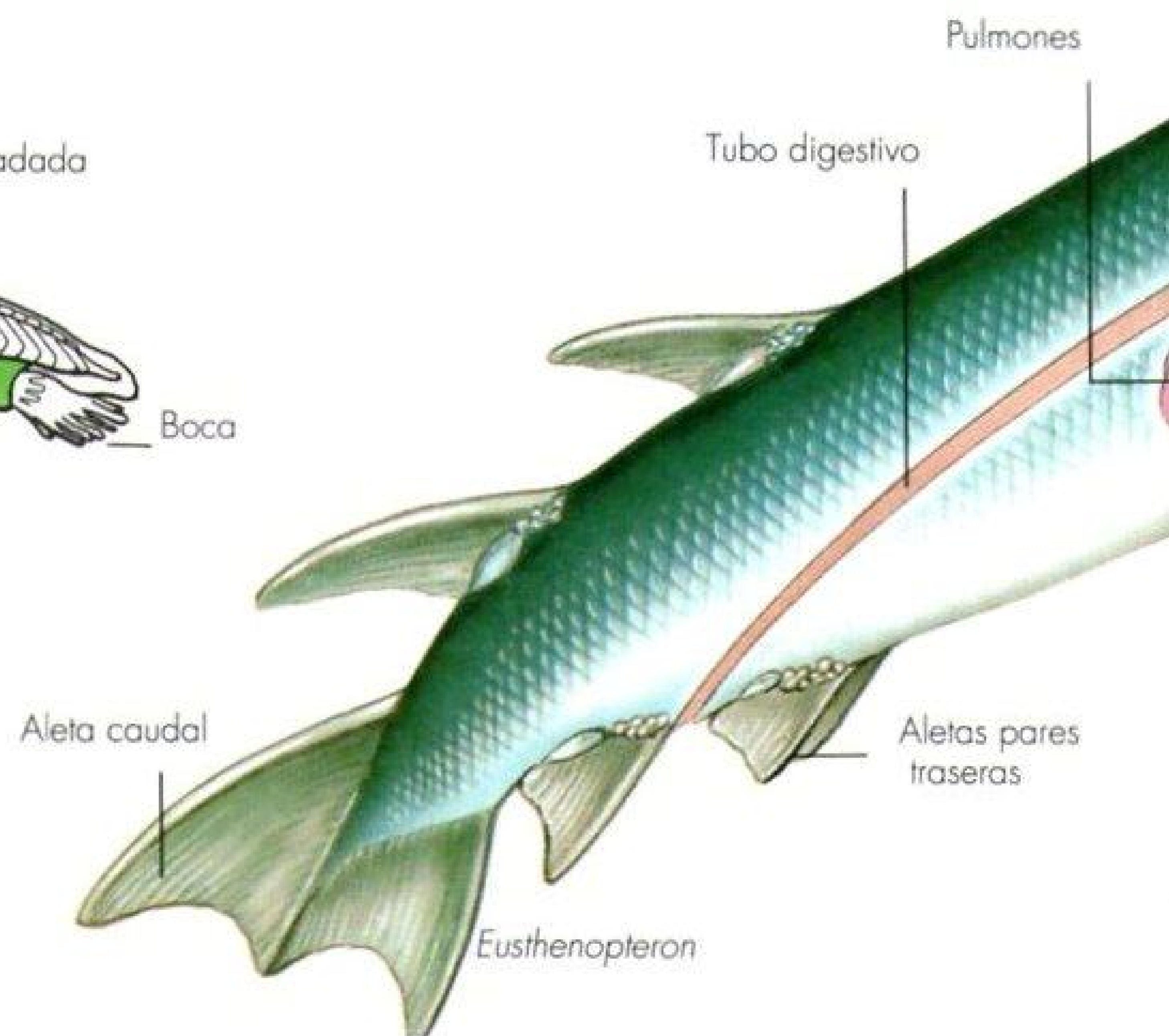
Uno de los triunfos más espectaculares de la evolución fue la transformación de los reptiles terrestres en aves voladoras (pp. 24-25). Otros dos grandes cambios evolutivos que abrieron nuevos caminos a la expansión de la vida fueron la transición de los peces a los anfibios y la evolución de los vertebrados nadadores, posiblemente a partir de antepasados semejantes a las ascidias.

Los anfibios colonizaron la tierra firme en el Devónico, hace unos 400 millones de años, y fueron los primeros vertebrados de vida terrestre. El origen de los primeros anfibios, como el *Ichthyostega*, ha intrigado durante mucho tiempo a los paleontólogos, pero todos están de acuerdo en que los primeros anfibios tuvieron que descender de uno de los tres grupos de peces de aletas lobuladas (sarcopterigios) que existían en aquellos tiempos. Dichos grupos son los peces pulmonados y los celacantos, que aún cuentan con representantes vivientes, y los ripidistios, que están ya extinguidos.

El eje central óseo que sostenía las aletas pares carnosas de aquellos peces parece un candidato obvio a precursor de los huesos de las extremidades de los anfibios. La evolución pudo modificar con facilidad los paquetes musculares que movían las aletas para adaptarlas a caminar por el suelo. Cada uno de los tres grupos de peces cuenta con partidarios que lo consideran el origen ancestral de los vertebrados terrestres. Los huesos de las aletas de los ripidistios eran muy similares a los de los anfibios primitivos, mientras que el desarrollo de los pulmones y las extremidades de los peces pulmonados actuales presenta nume-



El anfioxo es un cordado primitivo con una estructura corporal más simple que la de un pez agnato. Lo mismo que las ascidias, vive en el fondo del mar, filtrando alimentos a través de las hendiduras branquiales, pero el anfioxo conserva la capacidad de nadar durante la vida adulta, y puede desplazarse por medio de la cola y las aletas.



rosas similitudes con el de los anfibios modernos. Se cree que en el Devónico los tres grupos de peces habían desarrollado pulmones.

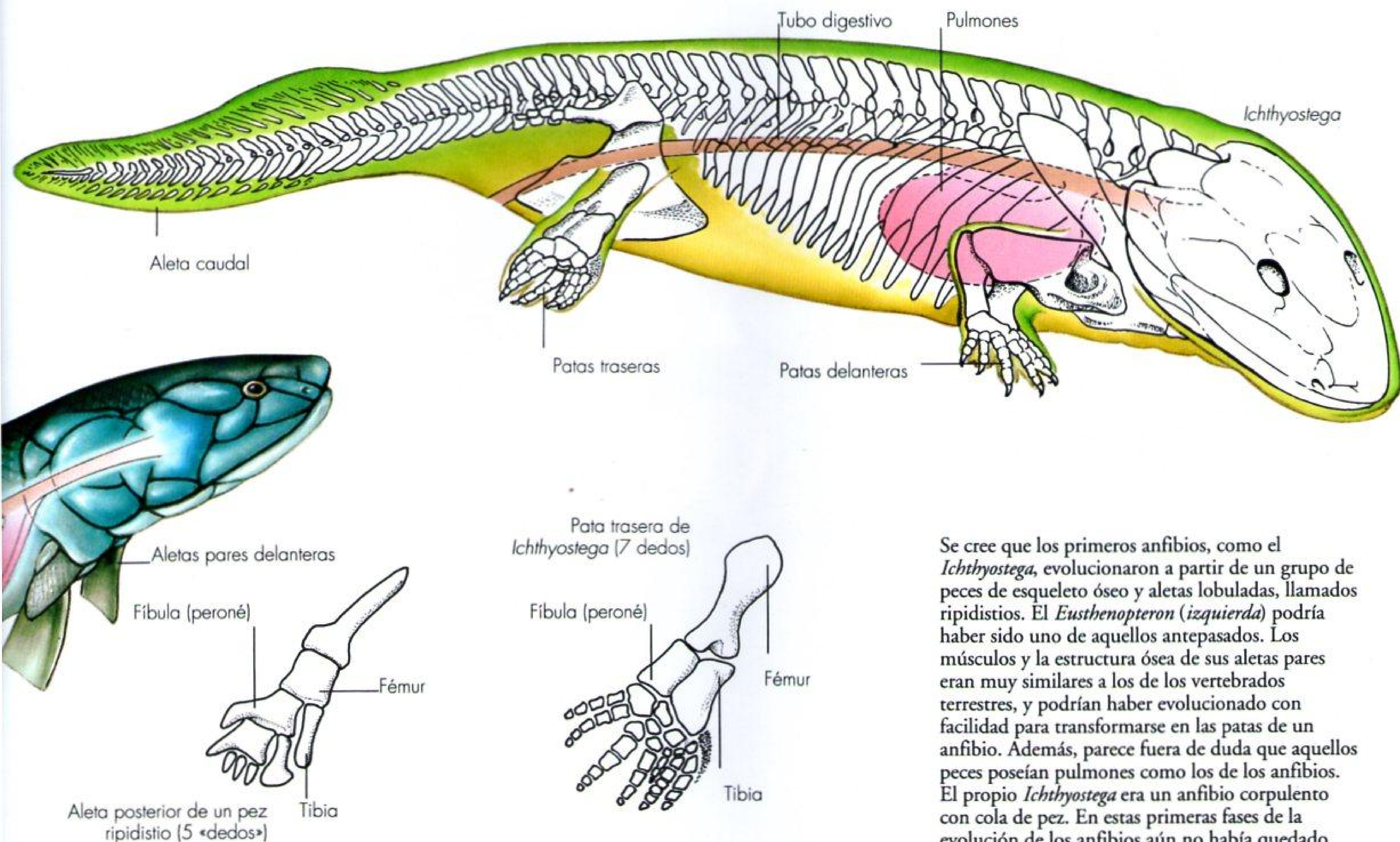
La transición de los peces a los anfibios ha quedado ilustrada en fósiles con características intermedias, como el diseño de los radios óseos de una aleta o la aparición de un orificio nasal en el hueso palatino, aunque se trata de restos que tienen 400 millones de años de antigüedad.

En cambio, no existen evidencias que permitan descifrar los orígenes de los primeros cordados invertebrados que dieron lugar a los vertebrados. No obstante, las especies actuales de cordados inferiores proporcionan pistas indirectas. Los anfioxos (género *Branchiostoma*, antes *Amphioxus*) son pequeñas criaturas que viven en el fondo del mar y poseen casi todas las características de un vertebrado... excepto las vértebras. El anfioxo nada como un pez, mediante músculos segmentados; su cuerpo se mantiene rígido gracias al notocordio; tiene hendiduras branquiales en la faringe y un cordón nervioso dorsal y hueco. Se necesitarían pocas alteraciones para convertir un animal ancestral semejante a un anfioxo en un pez agnato sin mandíbulas o un protovertebrado.

Pero, ¿cuál es el origen de la organización del anfioxo? Una fascinante teoría apunta a un grupo bastante improbable de cordados, las ascidias o tunicados. Las ascidias adultas son relativamente abundantes en aguas litorales, por debajo de la línea de la marea baja, donde forman parte importante de la comunidad de invertebrados marinos filtradores. Las ascidias son animales tubulares, en los que la parte anterior (o faríngea) del intestino se ha transformado, mediante numerosos orificios y ranuras, en un eficaz cedazo para filtrar agua de mar.

Las ascidias adultas son sedentarias, pero existe una fase larvaria semejante a un renacuajo que está adaptada para la dispersión. La forma de estas larvas, tan diferente de la de sus padres, fue lo que decidió a los taxonomistas a incluir al grupo en el *filum* cordados, que incluye a todos los vertebrados.

En el interior del cuerpo alargado del «renacuajo» se desarrolla una región caudal aplanada, sostenida por el notocordio y activada por músculos segmentados. Esta estructura permite al «renacuajo» nadar hasta que encuentra un lugar donde establecerse. Cuando se posa en el fondo pierde el equipo natatorio y se transforma en un filtrador sedentario. Una hipótesis sostiene que los cordados nadadores, como los anfioxos, descienden de renacuajos como éstos, que prolongaron su vida larvaria y alcanzaron la madurez sexual —un fenómeno conocido como neotenia— antes de perder la capacidad de nadar a través del agua.



Se cree que los primeros anfibios, como el *Ichthyostega*, evolucionaron a partir de un grupo de peces de esqueleto óseo y aletas lobuladas, llamados ripidistios. El *Eusthenopteron* (*izquierda*) podría haber sido uno de aquellos antepasados. Los músculos y la estructura ósea de sus aletas pares eran muy similares a los de los vertebrados terrestres, y podrían haber evolucionado con facilidad para transformarse en las patas de un anfibio. Además, parece fuera de duda que aquellos peces poseían pulmones como los de los anfibios. El propio *Ichthyostega* era un anfibio corpulento con cola de pez. En estas primeras fases de la evolución de los anfibios aún no había quedado establecido el modelo típico de los tetrápodos, con cinco dedos en cada extremidad. Parece muy probable que el *Ichthyostega* tuviera siete dedos en cada uno de sus pies, semejantes a remos.

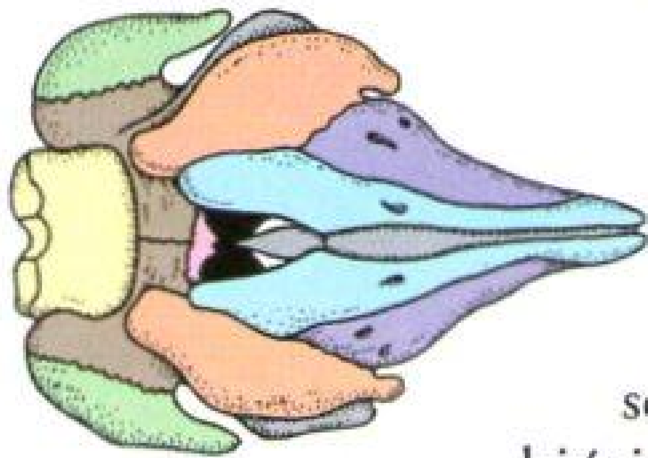


LA VIDA SE ADAPTA AL MUNDO



Los genes son las unidades fundamentales sobre las que actúa la selección natural. Entre la inmensa variedad de genes alterados por mutaciones, la selección natural elige los que contribuyan a mejorar el éxito reproductivo en circunstancias concretas. Si una ligera alteración de un gen provoca una adaptación que aumenta las probabilidades de tener descendencia, la selección hará que acabe siendo más frecuente que el gen original del que se derivó.

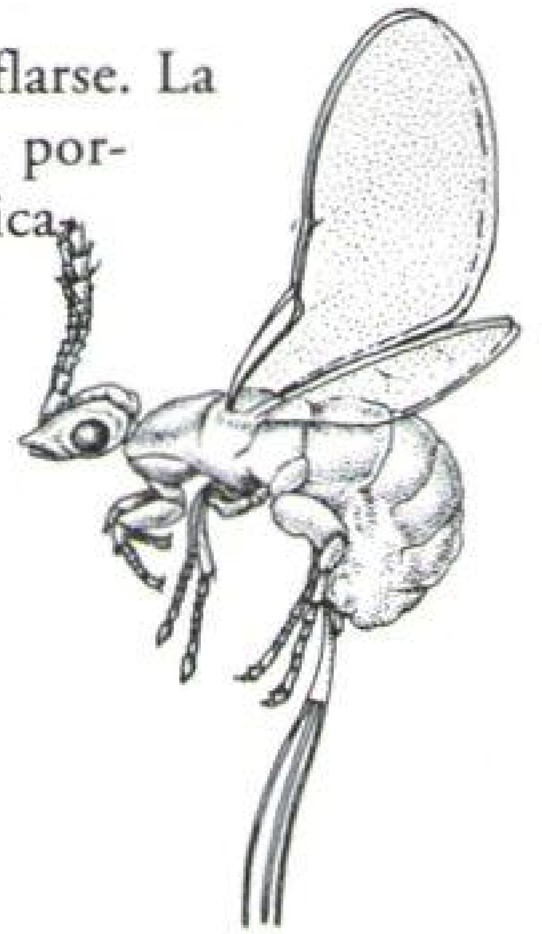
Una adaptación es un cambio que permite al organismo funcionar mejor y más eficientemente que un organismo similar que carezca de dicho cambio. El cambio adaptativo representa una ventaja para vivir en un hábitat concreto, en una época determinada y compartiendo el ecosistema con una comunidad de otras especies. Estos cambios pueden producirse a cualquier nivel, desde el molecular hasta el de organización social, desde la capacidad sensorial hasta las asociaciones simbióticas de especies que evolucionan juntas.



El motor del proceso de adaptación es la selección natural. Dado que las maneras en que se puede mejorar el éxito evolutivo son casi ilimitadas, los cambios adaptativos se producen en todos los niveles de la compleja jerarquía de componentes y procesos vitales. Sin embargo, la base molecular de todos estos cambios es siempre la misma. Las mutaciones genéticas son alteraciones de la secuencia de nucleótidos del ADN. Dichas secuencias alteradas codifican moléculas de proteínas ligeramente diferentes de las originales, y todo lo demás es consecuencia de esta alteración de las proteínas.

Esta generalización es aplicable a cualquier cambio adaptativo, ya se trate de una mayor capacidad de la sangre para transportar oxígeno (que puede resultarle muy ventajosa a una cabra que viva a gran altitud), de un colorido más vistoso en los pétalos de una flor (que atraerá mejor a los insectos polinizadores) o de una distorsión de la forma del cuerpo de un insecto, que le asemeje a una rama y le permita camuflarse. La gama de posibles cambios es inmensa, porque la alteración de las proteínas codificadas en los genes puede afectar a casi todos los aspectos de un ser vivo.





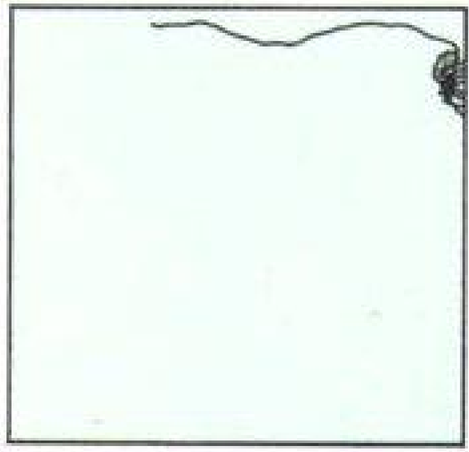
La estructura, la fisiología, la bioquímica y el desarrollo dependen de las proteínas. Estas versátiles sustancias son el material con el que se construyen los componentes celulares; prácticamente todas las estructuras vivas están formadas por proteínas. También son proteínas las enzimas que catalizan todas las reacciones del metabolismo celular. Otras proteínas actúan como mecanismos de control de los genes durante la diferenciación celular y el desarrollo de un individuo a partir de un huevo fecundado. La presencia de una proteína producida por un gen influye en la actividad de éste u otros genes, permitiendo la interacción entre ellos.

La selección de los cambios que resulten ventajosos en un contexto real podría hacer pensar que existe alguna fuerza motriz que impulsa la evolución en una dirección predeterminada. Se trata de una falacia seductora y recurrente, pero no existe ninguna inteligencia exterior que dirija los cambios evolutivos.

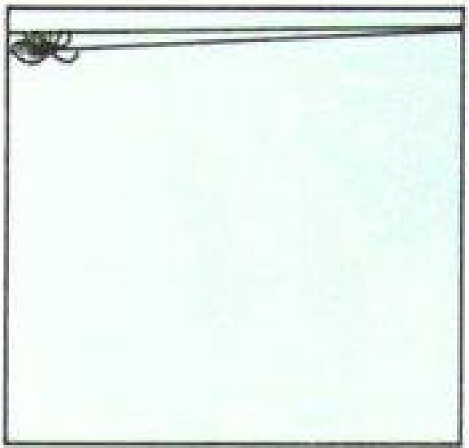
La evolución no avanza hacia un objetivo predeterminado y la selección natural carece de metas. El cambio evolutivo es consecuencia de la variación al azar y de las circunstancias locales, y la dirección que adopta viene determinada exclusivamente por la aparición casual de cambios que resulten ventajosos en circunstancias concretas.

Hay quien se resiste a aceptar esta falta de dirección y objetivos de la evolución, considerando necesario que exista un orden preconcebido, aparte del que impone la selección natural. Pero en realidad, la extraordinaria variedad, complejidad y delicadeza de las adaptaciones producidas por la llamada evolución «ciega», que han dado lugar a un complicadísimo árbol de relaciones evolutivas que abarca más de 3.000 millones de años, constituye la mayor maravilla del universo. No conocemos ningún otro sistema tan complejo e interconectado, y todo es resultado de la selección natural.

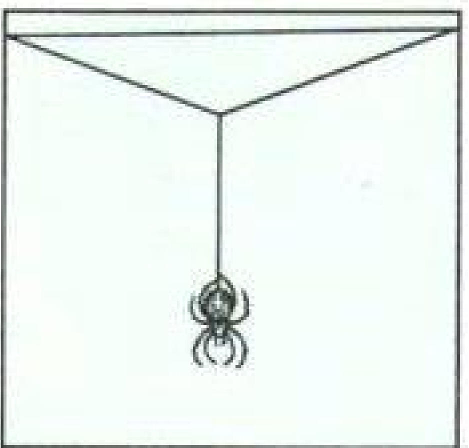




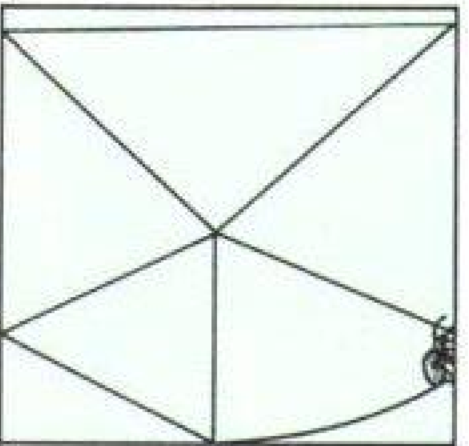
1



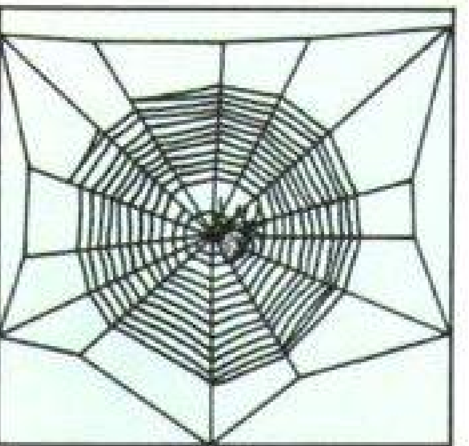
2



3



4



5

Las arañas construyen sus telas por etapas. Primero forman un bastidor de hilos no pegajosos, que sujetan a la vegetación (1-4). A continuación, comienzan a tender los hilos radiales de la tela (4). Cuando todos están colocados, la araña añade la espiral central de seda pegajosa (5), en la que quedarán atrapados los insectos voladores.

ADAPTACIONES ESTRUCTURALES



Un avión Boeing 747, un bloque de oficinas de 30 plantas y una mosca de la fruta son estructuras complejas, formadas por la combinación de componentes más simples, según un plan preexistente. Disponiendo de los planos de un 747, los ingenieros aeronáuticos pueden construir una copia exacta del avión. Si se le dan los planos detallados del bloque de oficinas, un arquitecto puede construir un edificio idéntico en otra parte. De manera similar, bajo el control de los genes de sus ocho cromosomas, un huevo fecundado de mosca de la fruta se desarrolla hasta convertirse en una nueva mosca. De estos tres ejemplos, el más complicado es, con gran diferencia, la diminuta mosca de la fruta.

Como todos los organismos, la mosca de la fruta presenta varios niveles estructurales diferentes. Ciertas células de la mosca están especializadas en fabricar proteínas concretas para las partes vivas del cuerpo, y también —con la adición de otras macromoléculas sintetizadas por las células— para las partes no vivas, como la cutícula que sostiene las alas. Las células similares están agrupadas formando tejidos y órganos. Esta detallada organización está dirigida por los genes que controlan todo el desarrollo de la mosca.

La construcción de los seres vivos se rige siempre por las mismas reglas, sin que importe su forma ni su tamaño. Los genes dirigen la formación de todas las estructuras, ya se trate del larguísimo intestino de una ballena azul, de las minúsculas alas de una mosca de la fruta o de una célula microscópica. Y puesto que todas las estructuras vivas están controladas por la actividad de los genes, también están sometidas a las presiones selectivas de la evolución y pueden alterarse para mejorar sus posibilidades de supervivencia, mediante los procesos de adaptación.

La estructura de un organismo, ya se trate de un animal, una planta o un microbio, es la culminación de su historia evolutiva, un largo proceso de especiación y adaptación. Esta historia tiene en cuenta todo lo que esté directa o indirectamente determinado por genes hereditarios. Por ejemplo, la historia evolutiva completa de una araña incluye las adaptaciones anatómicas que dieron como resultado su capacidad de hilar y tejer telas de seda —que están compuestas por proteínas codificadas en los genes de la araña y se construyen siguiendo pautas de conducta hereditarias—, y las que dieron forma a sus ocho patas de funcionamiento hidráulico y a sus colmillos para inyectar veneno.

Con el transcurso de las generaciones, las adaptaciones evolutivas van provocando cambios en la forma y el modo de vida de una especie. Pero no existen reglas generales que determinen la dirección que va a tomar una adaptación evolutiva. No obstante, la

Las estructuras que construyen los animales evolucionan igual que sus constructores. La seda de esta telaraña está compuesta por proteínas codificadas en los genes de la araña. Incluso el diseño de la tela viene determinado por unas pautas de conducta específicas, que también tienen origen genético. Tanto la composición de la seda como la forma de la telaraña son hereditarias y, por tanto, pueden experimentar (y experimentan) cambios evolutivos.



naturaleza de los cambios depende por completo de dos puntos de partida: el primero es el genotipo sobre el que actúa la selección; y el segundo, el contexto ambiental y competitivo en el que vive la especie.

Un mamífero, por ejemplo, no puede mejorar su sistema de nutrición haciéndose fotosintético como las plantas, aunque ésta sería una adaptación muy conveniente en climas soleados. Pero es imposible, porque el genotipo de los mamíferos carece de genes que pudieran llegar a generar la maquinaria molecular de la fotosíntesis.

Algunas condiciones competitivas recurrentes parecen generar ciertas tendencias de cambio adaptativo, como el aumento de tamaño de plantas y animales. La ventaja evolutiva del tamaño difiere según la especie y su posición ecológica. Si se trata de animales carnívoros, el aumento de tamaño puede situar a una especie —por ejemplo, el jaquetón o tiburón blanco— en la cúspide de la cadena alimentaria.

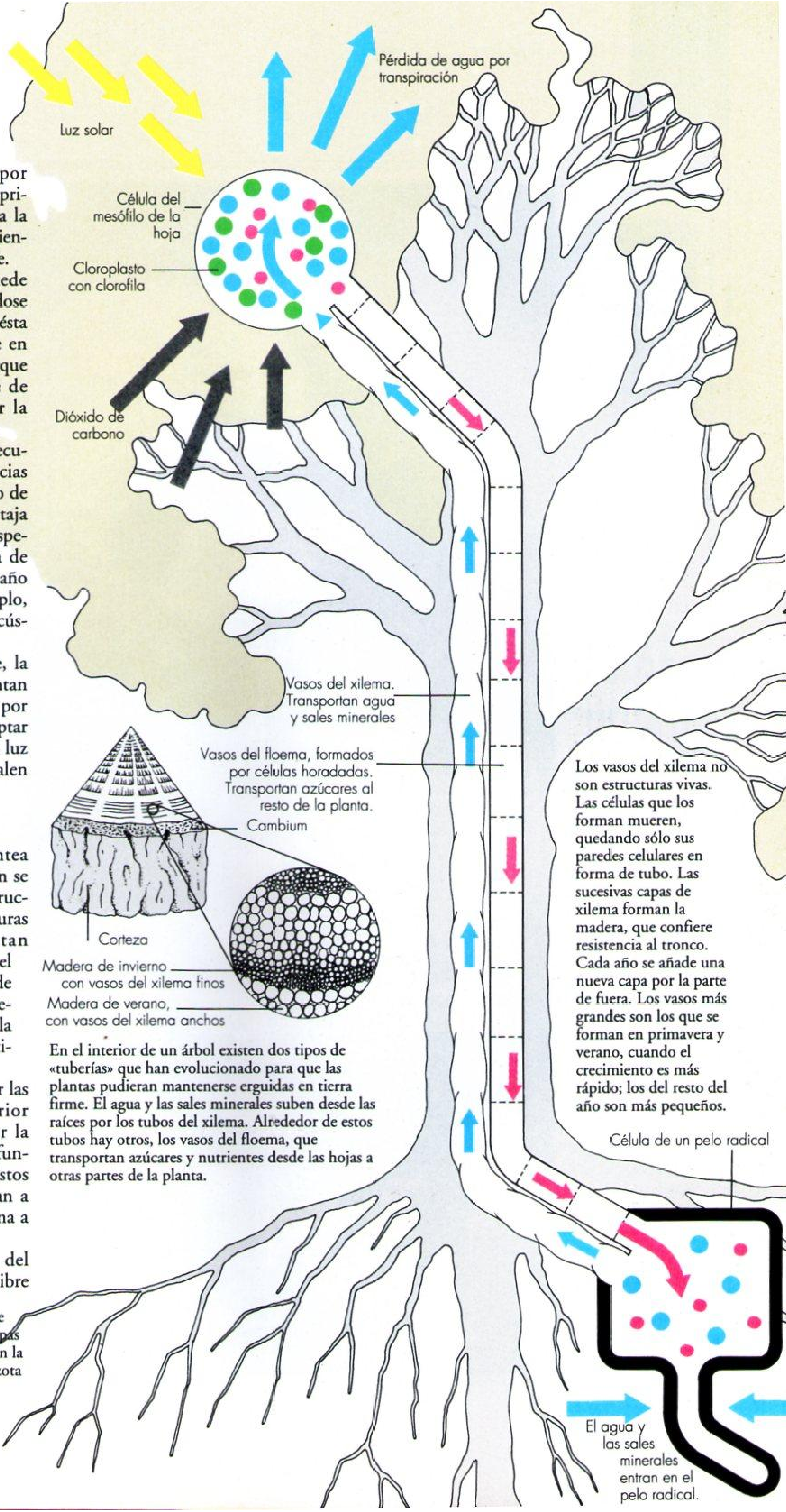
Si se trata de árboles de un bosque, la altura, el tamaño y la elevación presentan la ventaja de poder extender las hojas por encima de las especies vecinas, para captar mejor la luz. En la competencia por la luz solar disponible, los árboles grandes salen ganando.

HACES VASCULARES

Sin embargo, el gran tamaño plantea problemas de bioingeniería que también se han resuelto mediante adaptaciones estructurales. Los árboles grandes son estructuras pesadas y voluminosas que necesitan soporte físico y un sistema para elevar el agua desde el suelo hasta las hojas, donde tiene lugar la fotosíntesis. También necesitan transportar a todas las partes de la planta los azúcares y otras sustancias útiles producidas en las hojas.

La colonización de la tierra firme por las plantas en el Silúrico —y su posterior diversificación— se vio facilitada por la evolución de tejidos conductores multifuncionales, llamados haces vasculares. Estos haces de tubos microscópicos se forman a partir de células cilíndricas colocadas una a continuación de la otra.

Uno de estos sistemas —los vasos del xilema— está formado por tubos de calibre



En el interior de un árbol existen dos tipos de «tuberías» que han evolucionado para que las plantas pudieran mantenerse erguidas en tierra firme. El agua y las sales minerales suben desde las raíces por los tubos del xilema. Alrededor de estos tubos hay otros, los vasos del floema, que transportan azúcares y nutrientes desde las hojas a otras partes de la planta.

El tronco de un árbol es un perfecto andamiaje para el follaje vivo. Su estructura interna de capas de vasos le confiere una enorme resistencia, con la suficiente flexibilidad para oscilar cuando lo azota el viento.



El panda gigante posee un sexto dedo, un «pulga» que ha evolucionado a partir de un hueso de la muñeca. Esta adaptación le sirve para agarrar con más eficiencia los tallos de bambú. Ni los osos ni los mapaches —los parientes más próximos del panda— poseen esta adaptación.

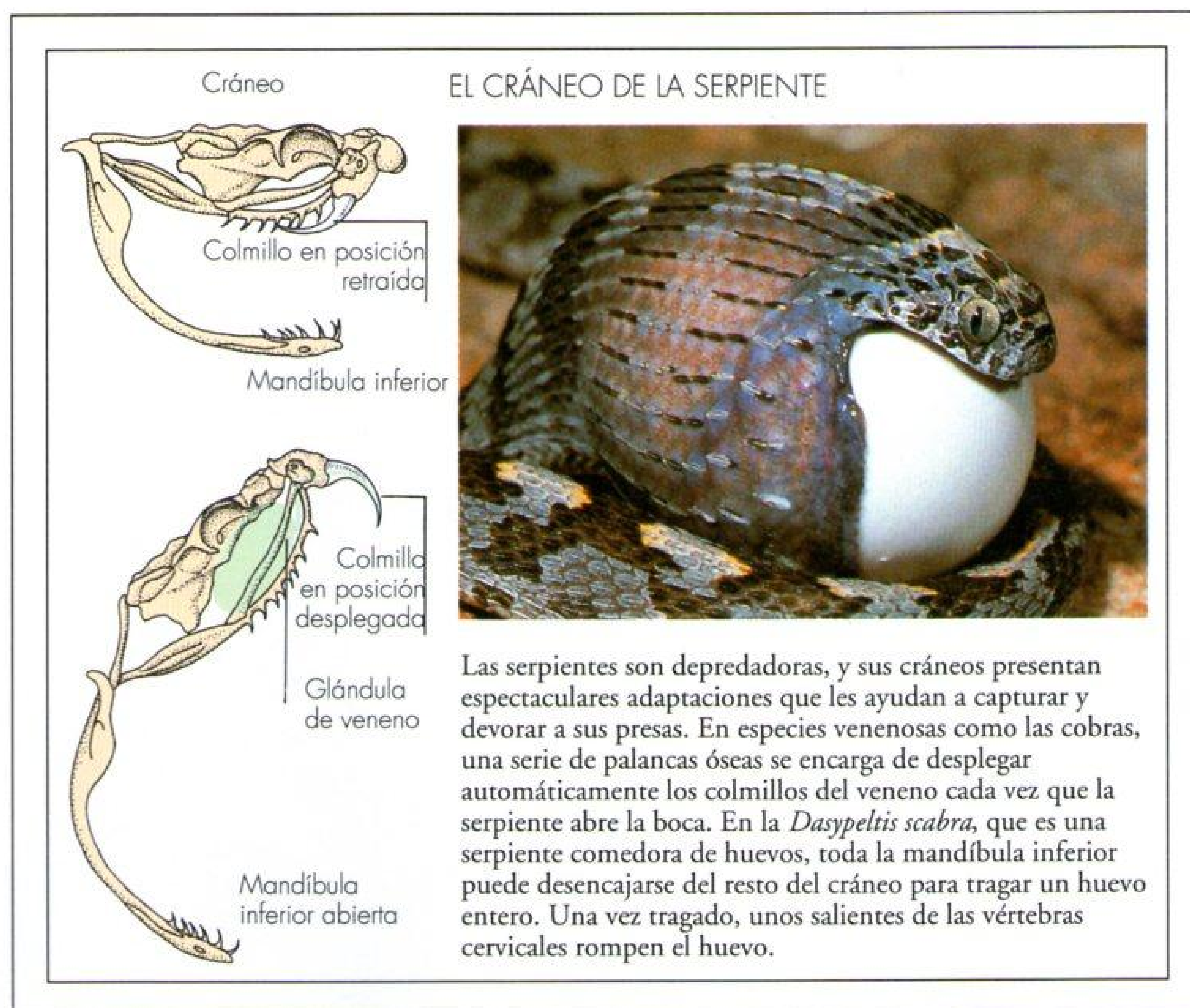






ancho, hechos de celulosa dura y flexible, que en los árboles y otras plantas leñosas se endurece aún más con materiales como la lignina y la hemicelulosa. Estos tubos se encargan de transportar agua y sales minerales desde las raíces al resto de la planta. Pero, además, el conjunto de todos ellos sirve de soporte. Los árboles se hacen más gruesos cada año, añadiendo una nueva capa periférica de vasos de xilema, que forma un anillo anual de crecimiento.

La masa principal de un árbol es un andamiaje no vivo, formado por tubos de xilema paralelos, que no sólo proporciona un sostén flexible ante la fuerza de los vientos laterales, sino que además confiere al tronco y las ramas la rigidez necesaria para sostenerse en contra de la fuerza de gravedad.



Las serpientes son depredadoras, y sus cráneos presentan espectaculares adaptaciones que les ayudan a capturar y devorar a sus presas. En especies venenosas como las cobras, una serie de palancas óseas se encarga de desplegar automáticamente los colmillos del veneno cada vez que la serpiente abre la boca. En la *Dasypeltis scabra*, que es una serpiente comedora de huevos, toda la mandíbula inferior puede desencajarse del resto del cráneo para tragar un huevo entero. Una vez tragado, unos salientes de las vértebras cervicales rompen el huevo.

ADAPTACIONES DE LOS HERBÍVOROS

Los azúcares y otras sustancias producidas en las hojas de las plantas verdes proporcionan a los animales herbívoros la base de su nutrición. Los herbívoros comen toda clase de materiales vegetales, y han desarrollado adaptaciones anatómicas y fisiológicas que les permiten arrancar, digerir y aprovechar los alimentos vegetales de la manera más eficiente posible.

En algunos grupos zoológicos en los que la alimentación herbívora constituye una antigua e ininterrumpida tradición se ha desarrollado toda una gama de adaptaciones anatómicas y metabólicas para aprovechar el alimento. Los dientes, las mandíbulas y la complicada organización del tubo digestivo de los bóvidos —la familia de la vaca— revelan una larga historia de consumo de hierba. La hierba y las hojas de muchas plantas no resultan muy nutritivas para los animales con fisiología digestiva normal, ya que constan principalmente de agua y celulosa indigerible.

Pero las vacas y otros herbívoros especializados, como los termes, han superado esta pobreza nutritiva de los alimentos ricos en celulosa, desarrollando una fisiología digestiva y una estructura del tubo digestivo que dependen de la fermentación del alimento vegetal por microorganismos. Esta fermentación descompone la celulosa en nutrientes que pueden ser aprovechados por la vaca o la termita.

EL PANDA GIGANTE

La historia evolutiva del panda gigante ofrece otra muestra del funcionamiento de las fuerzas adaptativas. Este animal se ha convertido en herbívoro, a pesar de partir de una situación genética que le predisponía a ser carnívoro, y en la actualidad depende exclusivamente de una dieta de hojas, tallos y brotes de bambú.

El panda gigante, *Ailuropoda melanoleuca*, ha constituido un enigma desde que el padre Armand David, misionero y naturalista francés, lo describió por primera vez durante un viaje a China en 1869. Todavía se sigue discutiendo si el panda gigante y el pequeño panda rojo pertenecen a una familia aparte, a la familia de los osos (úrsidos) o a la del mapache (prociónidos). Recientemente, mediante el análisis molecular de sus ADNs y sus proteínas, se ha logrado determinar la diferencia genética entre los osos, los mapaches y los pandas, facilitando el estudio de su parentesco evolutivo.

El grupo ancestral que dio origen a los osos y los mapaches existió hace unos 40 millones de años. Unos cinco millones de años después, los precursores de los osos y los de los mapaches se habían diferenciado. Tras una pausa de otros cinco millones de años, de la rama de los mapaches se separó otra rama, cuyo único representante actual es el panda rojo. El panda gigante pertenece a una subfamilia que se escindió de las demás subfamilias de la rama de los osos hace unos 20 millones de años.

El panda gigante blanco y negro es, en realidad, un oso especializado en comer bambú y presenta curiosas adaptaciones a este modo de vida. Su cráneo es elevado, para permitir la inserción de los fuertes músculos que mueven las mandíbulas, y los molares son anchos para triturar los duros tallos de bambú, que están reforzados con sílice. Sin embargo, el tubo digestivo del panda ha variado muy poco en relación con el de sus antepasados carnívoros, que tienen un estómago sencillo y un intestino corto, inadecuados para rumiar. Los pandas no extraen tantos nutrientes de su dieta de bambú como extraería un rumiante, y por eso nunca llegan a almacenar grasa suficiente para hibernar, como hacen los osos.

EL SEXTO DEDO

Posiblemente, la adaptación anatómica más curiosa del panda gigante es el «pulgar» de más que tiene en cada una de sus zarpas delanteras. Este sexto dedo es un alargamiento de un hueso de la muñeca, el sesamoideo radial, que permite al panda



arrancar hojas de bambú con gran facilidad.

El pulgar del panda es un buen ejemplo de cómo funciona la evolución. Un observador que contemple a un panda arrancando hojas durante 12 horas al día con un dedo que ningún mamífero ha poseído antes o después, se preguntará por qué este animal ha tenido necesidad de desarrollar un sexto apéndice en cada mano. Lo más normal habría sido utilizar uno de los dedos ya existentes. Pero dichos dedos ya estaban prefigurados, formando una zarpa como la de los osos, y existían evidentes dificultades para que uno de ellos evolucionara hasta convertirse en un pulgar flexible y oponible como el de los primates. En lugar de eso, una variación genética en la estructura de la muñeca proporcionó la materia prima para la evolución del sexto dedo del panda.

ADAPTACIONES DE LAS SERPIENTES

El cráneo del panda gigante, tan diferente del de sus parientes más próximos, los osos, es un ejemplo de la plasticidad evolutiva de los huesos craneales. Pero en los cráneos de las serpientes podemos observar un ejemplo mucho más extremo de este tipo de cambios estructurales. En estos animales, las adaptaciones del cráneo forman parte de una serie de alteraciones del esqueleto en general, que adaptaron a las serpientes a un modo de vida subterráneo, excavador y carnívoro.

Las serpientes evolucionaron a partir de un grupo de lagartos que, probablemente, habían adoptado un modo de vida subterráneo. Las serpientes fósiles más antiguas que se conocen, como el género *Palaeophis*, vivieron a finales del Cretácico. En comparación con ellas, todas las serpientes actuales tienen el cráneo muy modificado *(ver recuadro de la p. 97)*. En las especies que poseen colmillos venenosos, los huesos son delgados y forman una serie de palancas para desplegar los colmillos a los lados de la mandíbula superior.

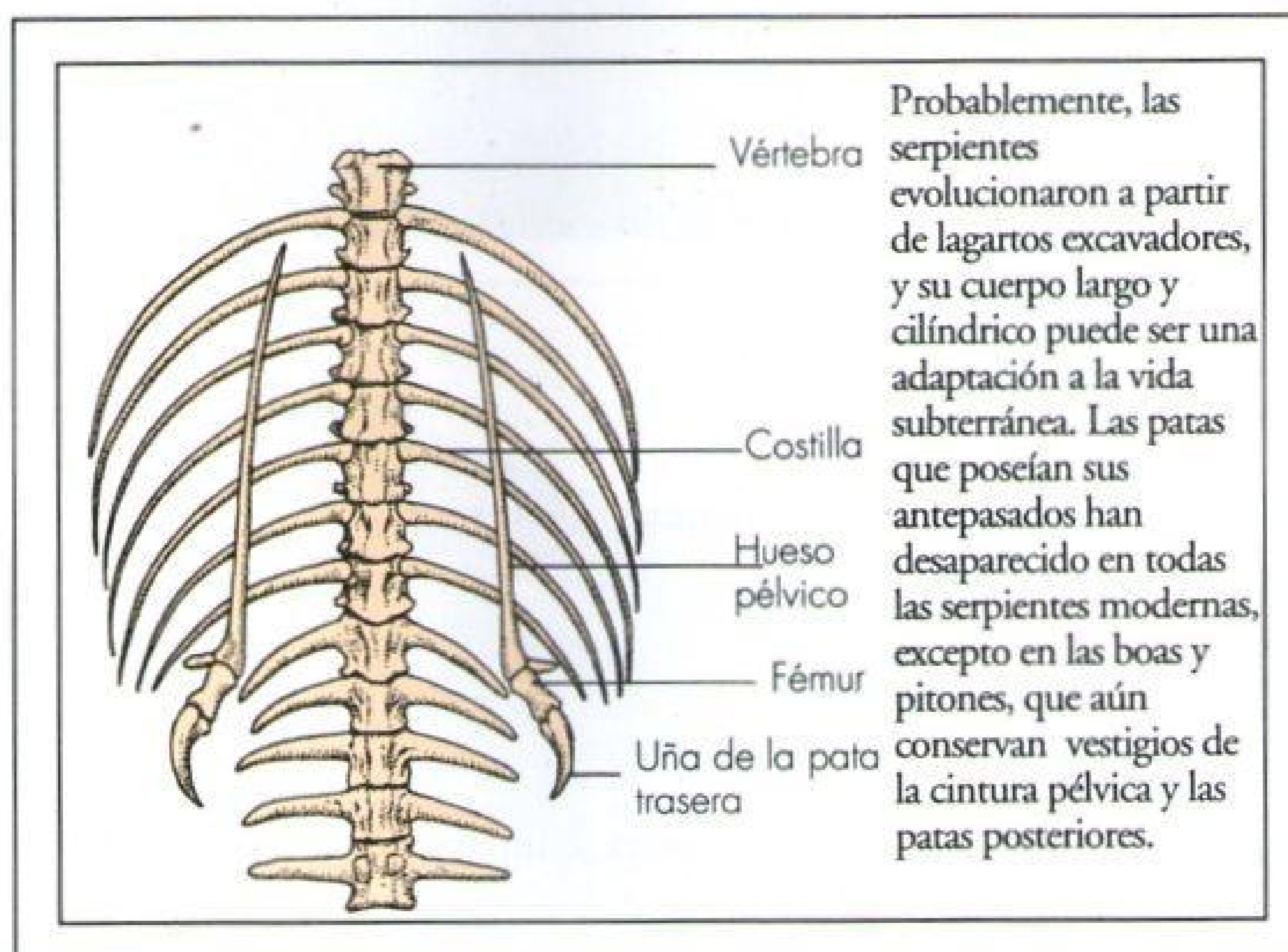
Al carecer de patas, las serpientes tienen que desplazarse mediante ondulaciones del cuerpo. Las articulaciones entre las vértebras son flexibles para permitir este tipo de movimiento. El vientre está cubierto de escamas puntiagudas, cada una de ellas con

una varilla interna de sostén, que facilitan el agarre a las paredes de los túneles y otros tipos de superficies.

ADAPTACIONES A LA VIDA MARINA

La transformación evolutiva de unos reptiles normales con patas en serpientes ápodas constituye una de las adaptaciones esqueléticas más extremas que se han dado en los vertebrados terrestres. Su equivalente marino es la evolución de las ballenas, una historia de cambios orgánicos generalizados.

Desde el final del Cretácico, hace unos 65 millones de años, ciertos mamíferos terrestres, cuadrúpedos peludos y carnívoros de pequeño tamaño —posiblemente, similares a especies como *Andrewsarchus*—, se fueron transformando en enormes cria-



Probablemente, las serpientes evolucionaron a partir de lagartos excavadores, y su cuerpo largo y cilíndrico puede ser una adaptación a la vida subterránea. Las patas que poseían sus antepasados han desaparecido en todas las serpientes modernas, excepto en las boas y pitones, que aún conservan vestigios de la cintura pélvica y las patas posteriores.

Casi todas las serpientes se desplazan mediante ondulaciones laterales del cuerpo, apoyándose en las irregularidades del terreno. Pero esta víbora del desierto, *Bitis peringueyi*, ha desarrollado un método diferente, adaptado a la arena blanda: desplaza su cuerpo lateralmente, apoyando sólo dos puntos en el suelo y dejando un rastro de marcas paralelas.



turas marinas, dotadas de aletas, cola natatoria y cuerpos hidrodinámicos, de piel lisa y sin pelo.

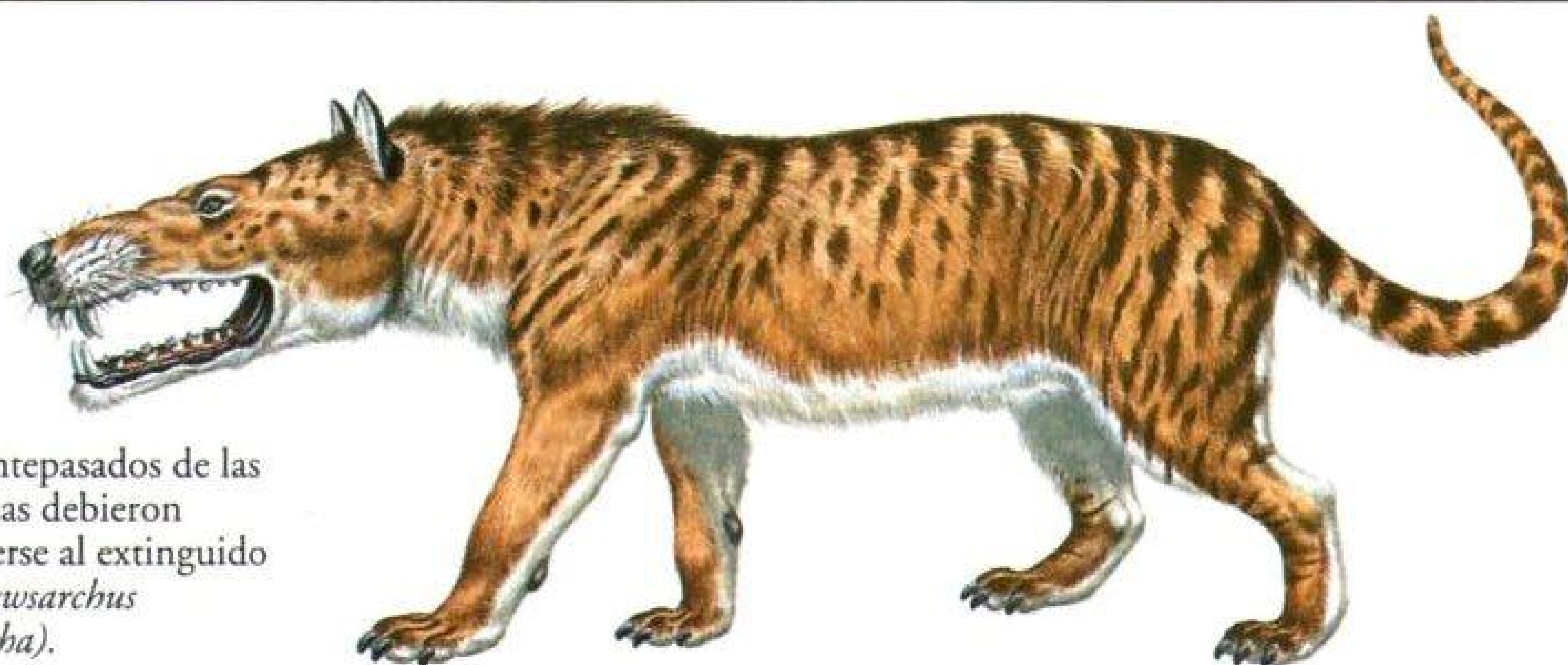
Probablemente, esta transformación se inició a consecuencia de los cambios ocurridos en el ambiente marino, tras las extinciones masivas del final del Cretácico (pp. 186-87). Hasta entonces, los mayores depredadores de los mares eran grandes tiburones y enormes reptiles. Animales como los plesiosaurios y los pliosaurios (con cuatro grandes aletas semejantes a alas de avión) y los ictiosaurios (de forma semejante a la de los actuales delfines, con aletas pares delanteras y traseras, aleta dorsal y aleta caudal) ocupaban casi todos los nichos existentes en el mar para los grandes depredadores. Pero ninguno de los grandes reptiles carnívoros sobrevivió en la era Terciaria. La ausencia de competidores permitió que algunos carnívoros terrestres, que ya eran capaces de introducirse en el mar para cazar, se adaptaran aún más a la vida marina.

LAS PRIMERAS BALLENAS Y EL LAGARTO REY

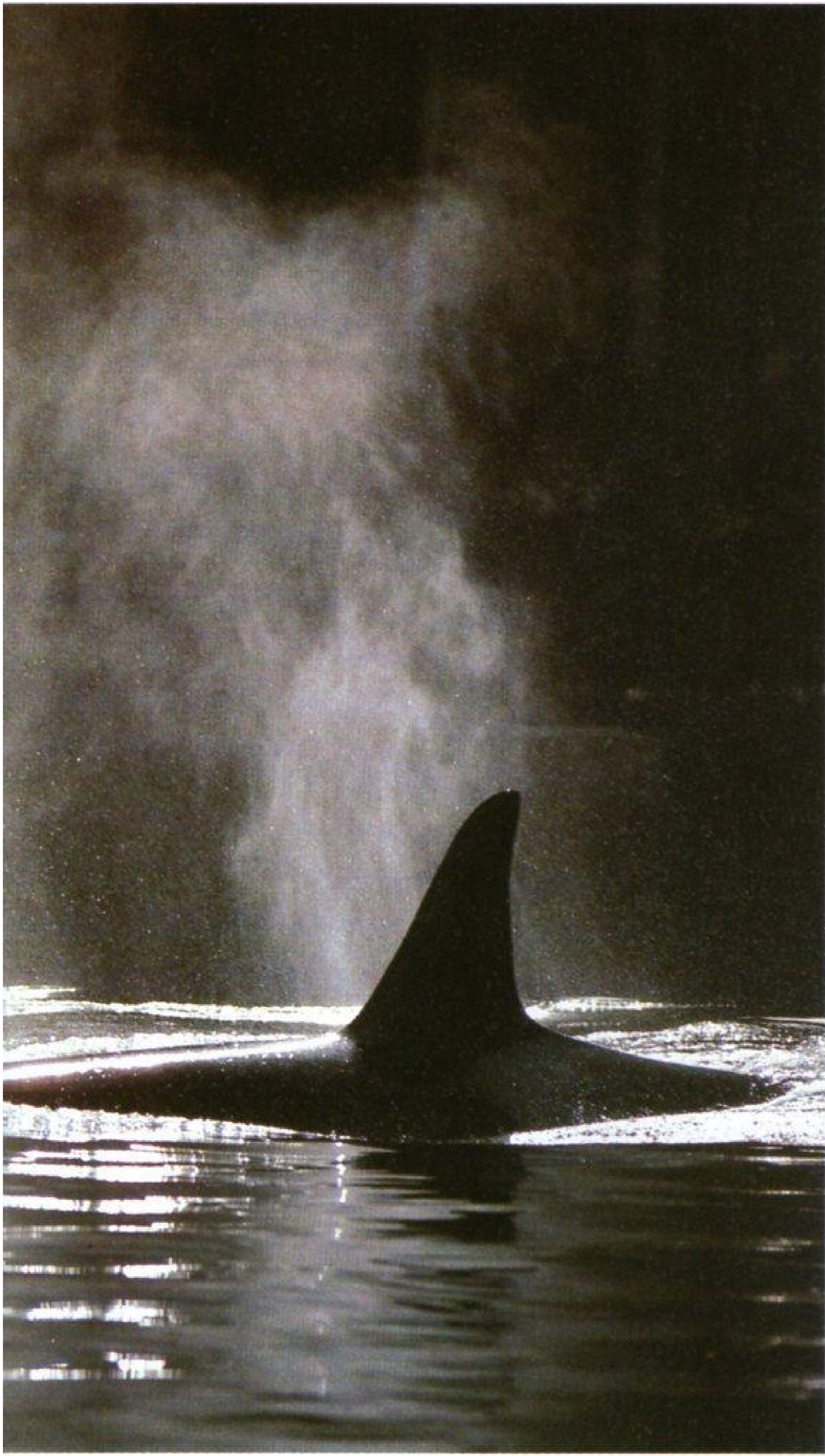
Según el registro fósil, el linaje de las ballenas se remonta a unos 54 millones de años atrás, cuando aparecieron los arqueocetos, animales cuadrúpedos con aspecto de focas, que no estaban completamente especializados en la vida acuática. Los huesecillos de su oído, por ejemplo, no presentaban las adaptaciones características para funcionar bajo el agua que se observan en las formas más avanzadas. En realidad, sus fósiles se han encontrado en compañía de restos de otros animales terrestres, lo cual podría indicar que sólo vivían en el mar temporalmente.

A mediados del Eoceno, este proceso tentativo de formación de mamíferos marinos carnívoros había dado lugar a especies como el enorme *Basilosaurus isis*, cuyos fósiles, de 15 metros de longitud, se han encontrado en los desiertos de Egipto, en areniscas de origen marino. El *Basilosaurus* se descubrió a principios del siglo XIX, y en un principio se creyó erróneamente que se trataba de un reptil gigante; de ahí su nombre, que significa «lagarto rey». En 1839, el paleontólogo británico Richard Owen estudió su esqueleto y se dio cuenta de que aquel enorme animal era un mamífero, y además muy parecido a las ballenas.

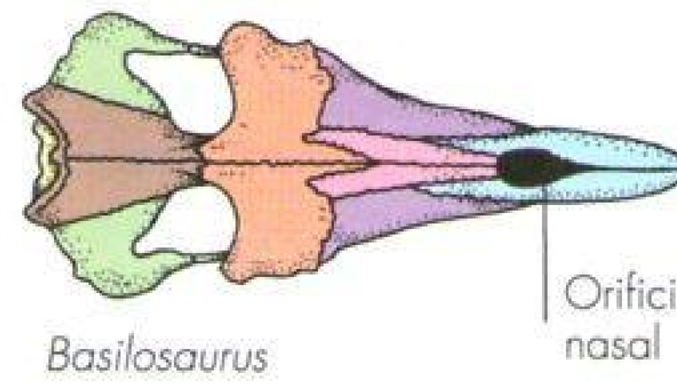
En 1990, paleontólogos de la Universidad de Michigan estudiaron más a fondo las características del *Basilosaurus* y lo

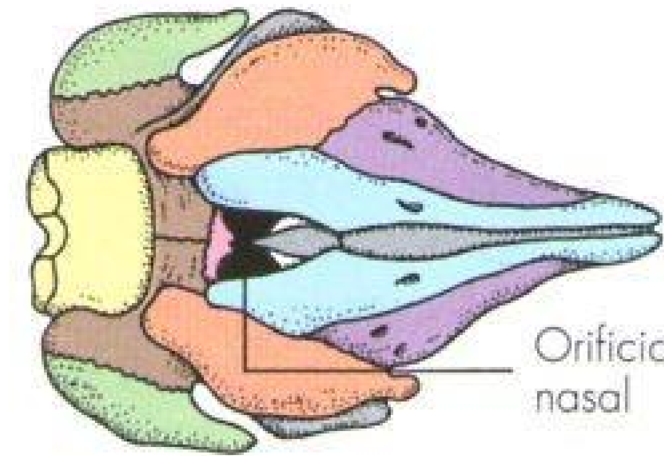


Los antepasados de las ballenas debieron parecerse al extinguido *Andrewsarchus* (derecha).



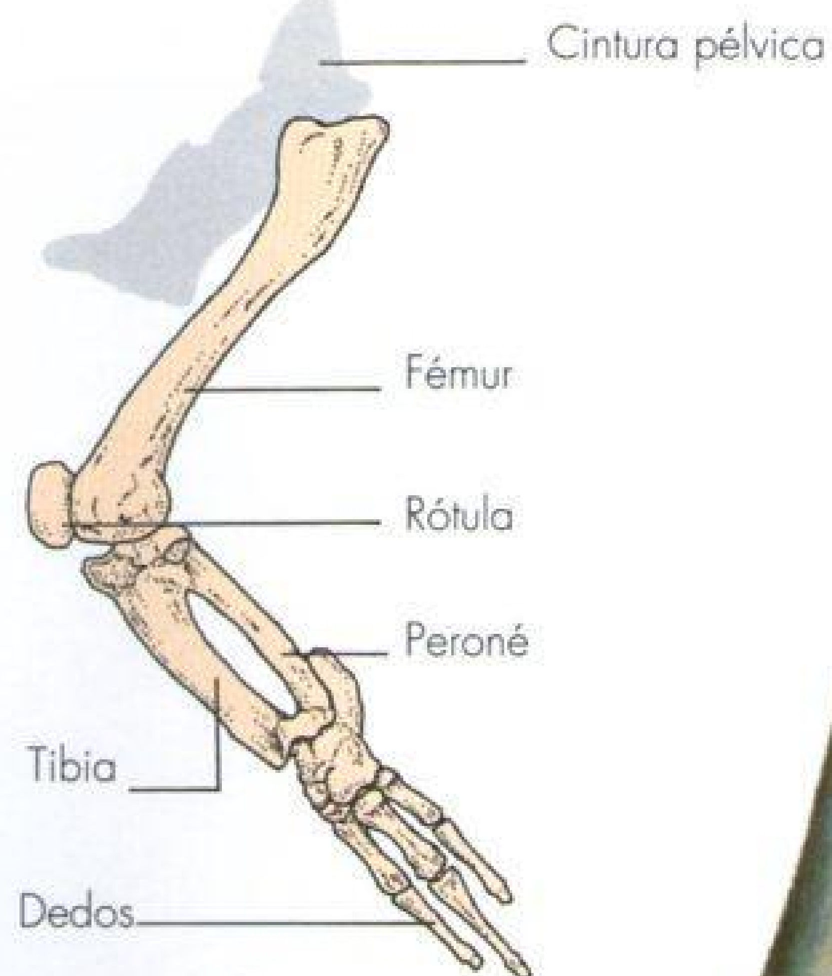
DEL ORIFICIO NASAL AL RESPIRADERO





Durante la evolución de los cetáceos, los orificios nasales se fueron desplazando hacia atrás, desde el extremo del hocico a la parte superior del cráneo, formando un respiradero que permite a los cetáceos respirar sin tener que sacar toda la cabeza del agua. En el *Basilosaurus*, un cetáceo primitivo que vivió hace unos 40 millones de años, el orificio ya se había desplazado un poco; hace 15 millones de años existían animales parecidos a los delfines, con el respiradero casi en lo alto del cráneo, cuyos huesos se habían modificado para adaptarse al cambio.

Pata trasera de *Basilosaurus*



En menos de 50 millones de años, la evolución ha transformado a un cuadrúpedo terrestre en un animal marino fusiforme. Las orcas, *Orcinus orca (arriba)*, son tal vez los cetáceos actuales más rápidos y feroces.

Como las ballenas modernas, el *Basilosaurus* tenía un cuerpo hidrodinámico, con aletas delanteras y aleta caudal horizontal. Pero, a diferencia de las ballenas modernas, que ya no conservan ni rastro de las patas posteriores de sus antepasados, el *Basilosaurus* poseía pequeñas patas traseras, que podía flexionar y extender, y que debían servirle para agarrarse a la pareja durante la cópula.

situaron a mitad de camino entre los cetáceos modernos y sus antepasados terrestres. Los grandes dientes eran típicos de carnívoro, y los orificios nasales se habían desplazado hacia atrás, desde la punta del hocico hasta la parte alta de la cabeza.

Además de un par de grandes aletas delanteras, el *Basiliosaurus* tenía patas traseras con pies, demasiado pequeñas para servirle como remos impulsores. El estudio de las articulaciones de estos miembros fósiles, para deducir sus posibles movimientos, permite suponer que servían para agarrarse a la pareja durante los apareamientos en el agua.

CAMBIOS EN EL DISEÑO DEL CUERPO

Las primitivas ballenas del Eoceno, como el *Basilosaurus*, debieron dar origen, por rutas adaptativas que no están bien documentadas en el registro fósil, a los dos grupos de cetáceos modernos: los cetáceos con dientes (odontocetos) y los sin dientes (mistacocetos). Los odontocetos modernos, con mandíbulas provistas de dientes de carnívoro, incluyen a los delfines de río, las orcas, los delfines marinos y el cachalote. Los mistacocetos comprenden varias especies de ballenas filtradoras, que pierden sus dientes funcionales en la edad adulta.

En todas estas especies, las adaptaciones anatómicas necesarias para la especialización en la vida acuática han provocado grandes cambios en el diseño típico del cuerpo de los mamíferos. En conjunto, estas adaptaciones son, casi con seguridad, las más extremas que se han dado en cualquier grupo de mamíferos de tamaño comparable.

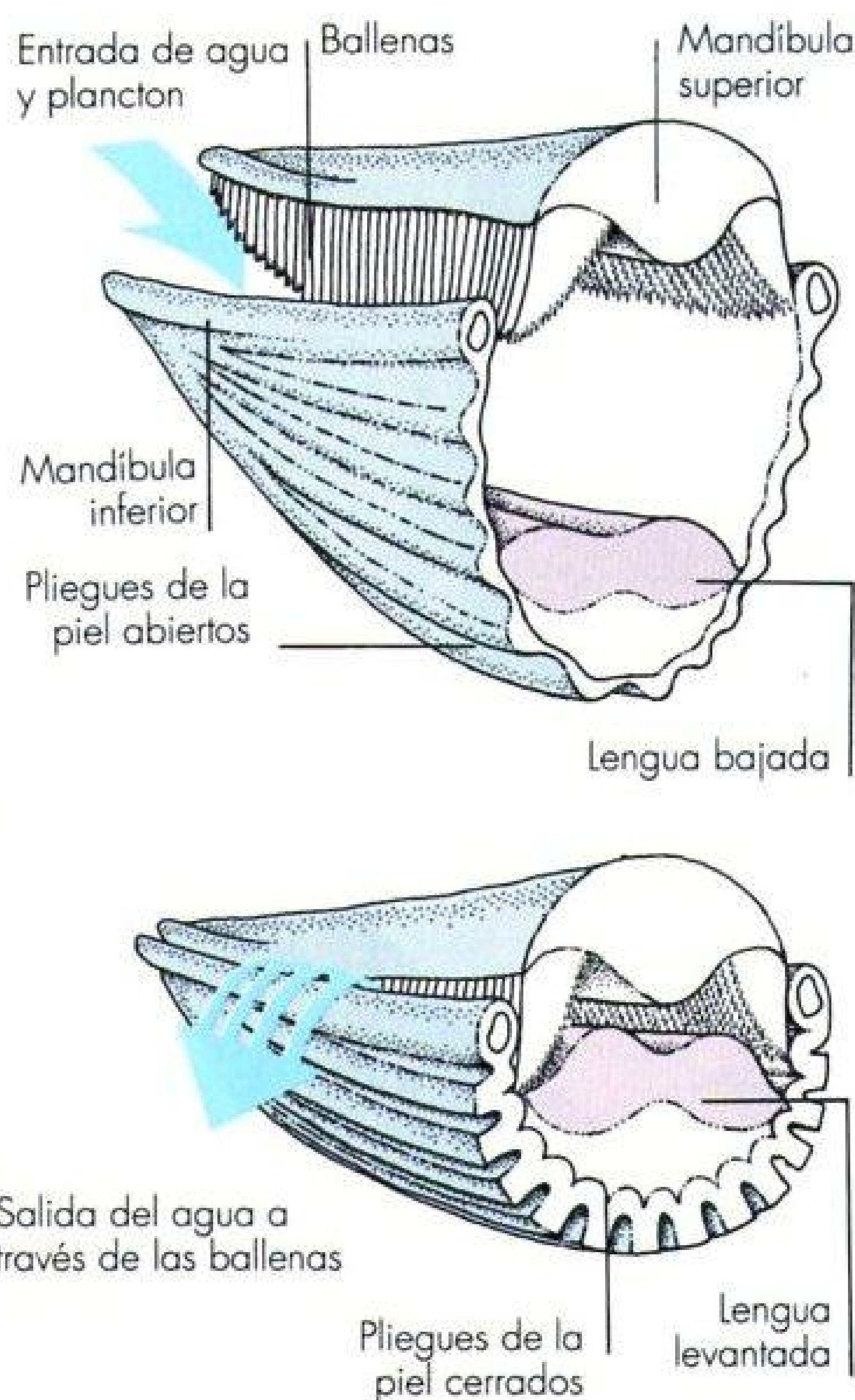
Las limitaciones de diseño impuestas por el movimiento a través de un líquido han dado como resultado una notable convergencia adaptativa entre los cetáceos, los peces y los antiguos plesiosaurios marinos. Todos estos grupos zoológicos adoptaron una forma hidrodinámica con cuerpo liso, para ofrecer una resistencia mínima al agua.

Los cetáceos modernos han conservado las extremidades anteriores, transformadas en aletas, para utilizarlas como timones y, en cierta medida, como remos. Pero el impulso principal para la natación lo proporcionan los movimientos hacia arriba y hacia abajo de la cola horizontal, que provoca movimientos ondulatorios en todo el cuerpo. Las aletas caudales tienen la misma forma y función que las de los peces, si exceptuamos que éstas son verticales y las de los cetáceos horizontales.

Los cetáceos más rápidos, como las orcas, delfines y marsopas, tienen aletas dorsales triangulares, muy semejantes a las de los tiburones, que actúan como estabilizadores al nadar a gran velocidad. En general, todas estas modificaciones han transformado al típico mamífero terrestre del

BALLENAS FILTRADORAS

Las grandes ballenas con barbas, como la yubarta (*Megaptera novaeangliae*), se alimentan por filtración, capturando enormes cantidades de krill (crustáceos parecidos a gambas) con las barbas o «ballenas» que cuelgan de su mandíbula inferior. La ballena se limita a abrir la boca, ingiriendo grandes cantidades de agua y krill. Los pliegues de piel de la garganta se expanden para dar cabida al agua. Luego la ballena cierra la boca y levanta la lengua, con lo que hace salir el agua, pero el krill queda atrapado en las barbas. Entonces la ballena recoge el krill con la lengua y se lo traga.





Terciario inferior en una máquina acuática de precisión. Mediante adaptaciones estructurales, un animal parecido a un perro acabó pareciéndose a un pez gigante que respira aire.

Las extremidades posteriores se han atrofiado, transformándose en soportes internos para los órganos reproductores. La piel ha perdido el pelo, quedando lisa para no ofrecer resistencia al agua, y con una capa aislante de grasa. Han aparecido aletas dorsales y caudales. La respiración aérea de sus antepasados se ha conservado, aunque modificada. Han evolucionado válvulas especiales para cerrar los orificios nasales o respiraderos cuando el animal se sumerge, y los propios orificios se han desplazado a lo alto de la cabeza.

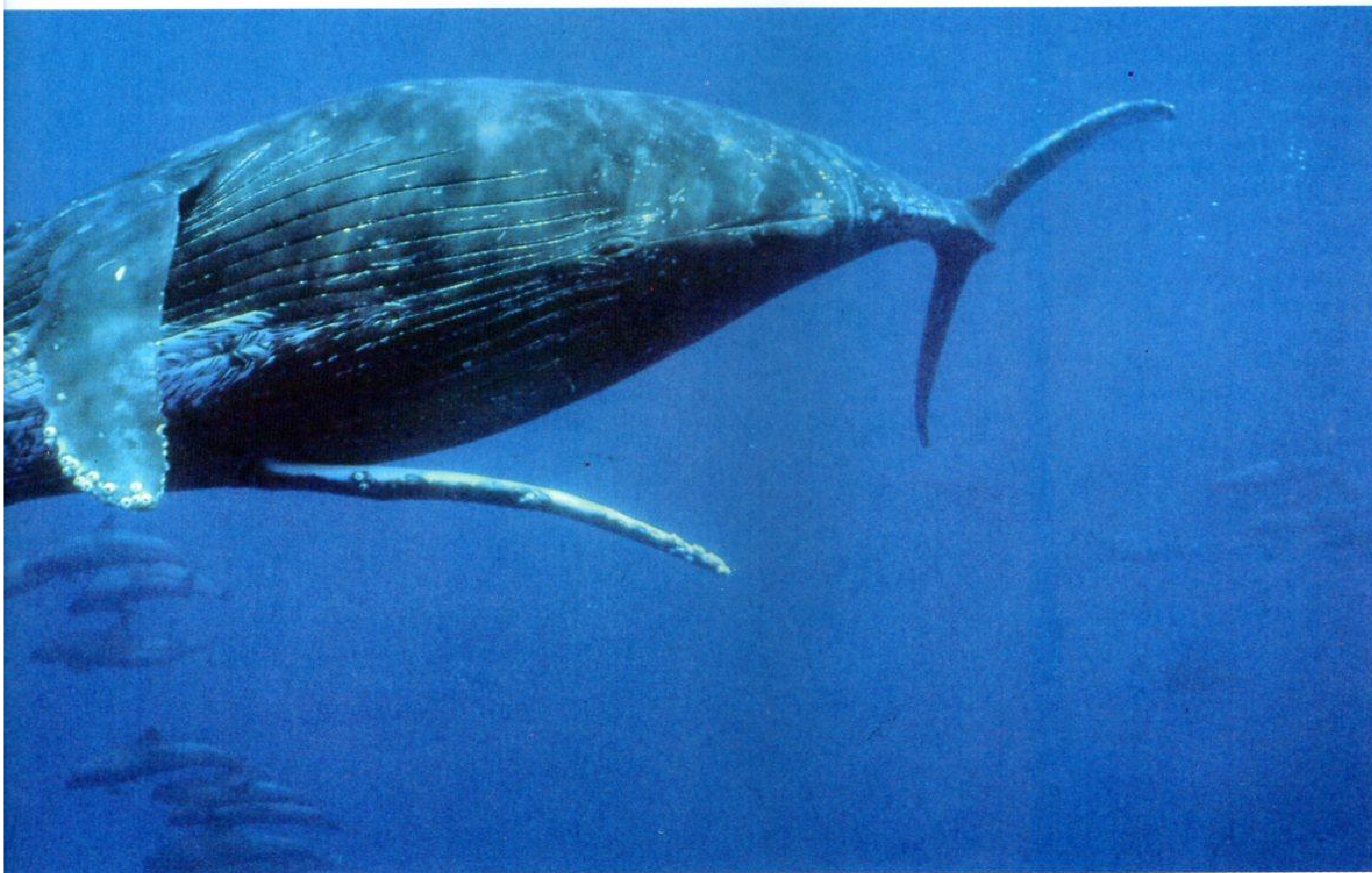
ADAPTACIONES ALIMENTARIAS

Las tácticas especializadas de nutrición forman parte del proceso evolutivo de diversificación de los cetáceos. Muchas de las especies con dientes, como los delfines, son básicamente piscívoras, y poseen numerosos dientes sencillos y cónicos para atrapar a sus presas. En la orca, esta técnica de caza se ha llevado al extremo, y sus poderosas mandíbulas pueden destrozar y tragar presas tan grandes como focas y pequeños cetáceos. En algunas de las ballenas con dientes especializadas en comer presas de cuerpo blando como los calamares, los dientes se han ido perdiendo, hasta quedar reducidos, en el caso del zifio calderón, a un solitario par en la mandíbula inferior.

Las ballenas sin dientes —los animales más grandes que jamás han existido— filtran su alimento, consistente en pequeños invertebrados marinos que forman parte del plancton. La mayor de todas es la ballena azul, *Balaenoptera musculus*, que puede llegar a medir 30 metros y pesar 143 toneladas, tanto como 20 elefantes. Se alimenta de krill (crustáceos semejantes a gambas) en los mares polares.

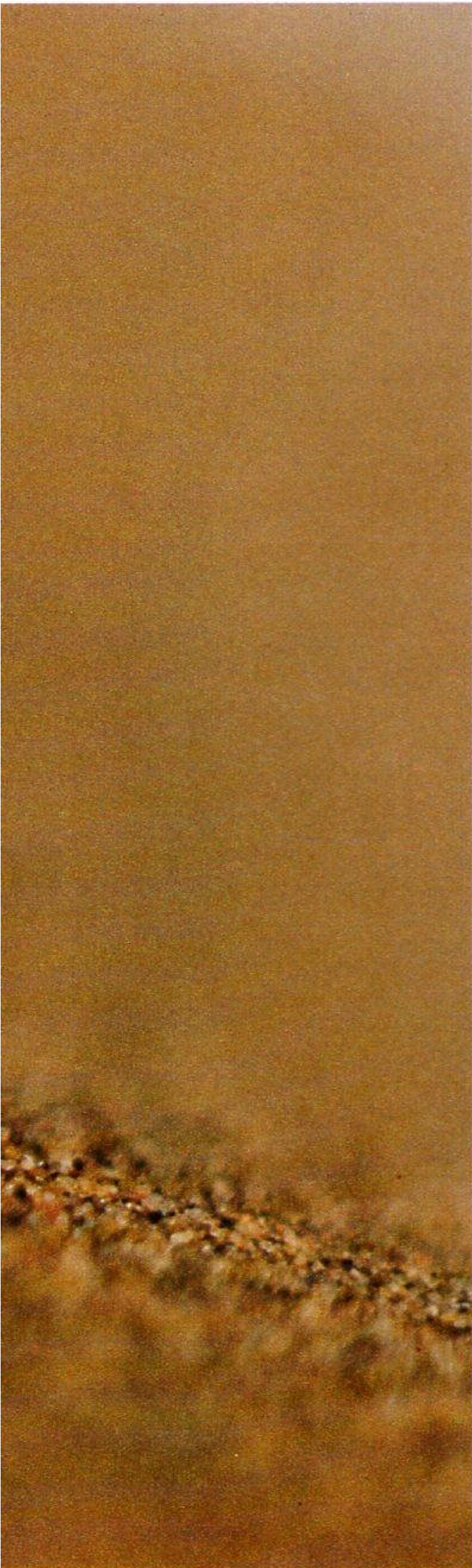
Como todas las ballenas sin dientes, la ballena azul posee unas mandíbulas muy adaptadas. Los dientes sólo aparecen transitoriamente en el feto, y en el animal adulto han desaparecido por completo. Para filtrar el plancton utiliza unas placas córneas («ballenas» o barbas) que cuelgan de la mandíbula superior *(ver recuadro)*.

Los presuntos antepasados cordados de los vertebrados (los tunicados o ascidias, pp. 88-89) eran diminutos filtradores marinos con la faringe perforada. La ballena azul, situada en la cúspide de una de las ramas más modernas del árbol evolutivo de los vertebrados, es millones de veces más grande que un tunicado, pero ha vuelto a adoptar la estrategia alimentaria de sus remotos antepasados. Como ellos, se alimenta por filtración, aunque lo que filtre sean enormes masas de crustáceos.





ADAPTACIONES FISIOLÓGICAS



El camuflaje verde de un insecto-hoja, las largas espinas de un cacto y el sexto dedo del panda gigante son adaptaciones muy visibles que confieren ventaja selectiva en ambientes concretos. El insecto-hoja puede ocultarse de los depredadores entre el follaje, las espinas protegen al cacto contra los herbívoros del desierto y el panda puede arrancar con facilidad las hojas de bambú.

Pero existen adaptaciones igualmente importantes que se manifiestan en el interior del organismo, a nivel molecular, y que configuran su fisiología y su bioquímica. Las mutaciones beneficiosas de los genes dan lugar a nuevas proteínas, que modifican o controlan procesos internos como la pérdida de agua, la respiración, la digestión y la fotosíntesis. Las adaptaciones fisiológicas y bioquímicas resultantes adaptan la maquinaria metabólica del organismo a un conjunto concreto de condiciones ambientales.

Los animales, plantas y microorganismos especializados para vivir en condiciones extremas, como el calor de los trópicos, la sequedad de los desiertos o las grandes altitudes, presentan abundantes pruebas de esta capacidad de adaptación, que puede modelar el funcionamiento interno de los seres vivos.

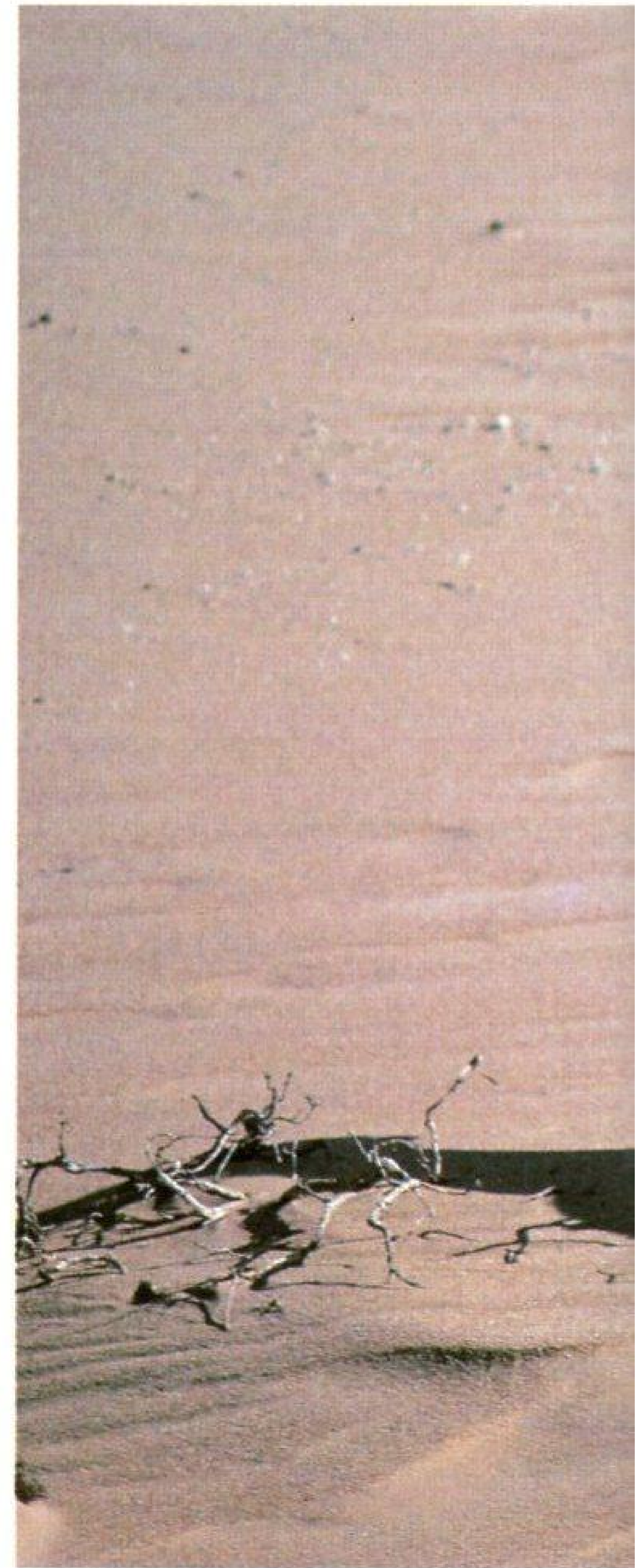
La hemoglobina de un animal que viva en grandes altitudes, con bajo nivel de oxígeno, constituye un claro ejemplo de cómo se puede producir un cambio bioquímico adaptativo como consecuencia de una mutación génica que sólo provoca la sustitución de un único aminoácido en una proteína. La hemoglobina, una proteína que contiene hierro, es la encargada del transporte de oxígeno en la sangre. Como respuesta a la presión selectiva del bajo contenido de oxígeno en el aire, las moléculas de hemoglobina de los animales que viven a grandes altitudes se han modificado para que el oxígeno se una a ellas con más fuerza. Esto se ha conseguido sustituyendo un solo aminoácido en la molécula de hemoglobina. La llama suramericana presenta esta adaptación, mientras que su pariente el camello no la posee.

En el desierto de Namibia (África suroccidental) vive un escarabajo que presenta una típica adaptación fisiológica a las condiciones calurosas y secas de los desiertos tropicales, donde resulta vital obtener agua y evitar perderla. Cuando se forma niebla procedente del océano Atlántico, el escarabajo trepa a lo alto de una duna de arena y se planta de cabeza, con los élitros y las patas traseras de cara a la brisa. El agua se condensa en su cutícula encerada y va resbalando por el cuerpo inclinado del escarabajo hasta llegar a la boca.

Este escarabajo africano, *Onymacris unguicularis*, se pone de cabeza para recoger gotitas de humedad condensada, que se deslizan por su cuerpo hasta llegar a la boca. En una de estas sesiones, el peso de su cuerpo puede aumentar un 40 por 100.







Gracias a sus adaptaciones para reducir al mínimo la pérdida de agua, la *Welwitschia* puede sobrevivir hasta en las zonas más secas del desierto de Namibia. La planta sólo abre sus estomas de noche, cuando el aire es más fresco, para absorber dióxido de carbono que almacena para la fotosíntesis, que se realiza durante el día.

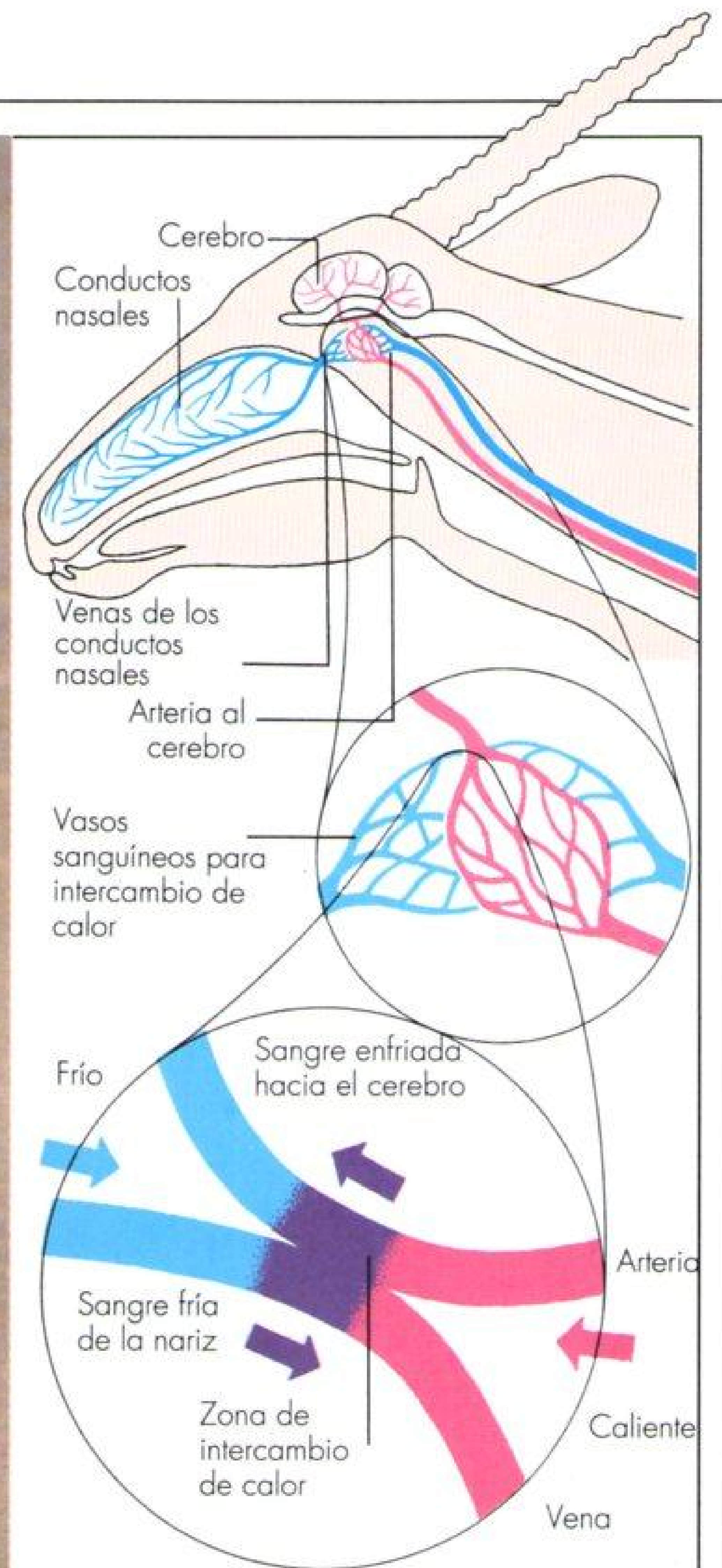
Todas las plantas que viven en los desiertos presentan adaptaciones para resistir la desecación. Con el fin de reducir la pérdida de agua por evaporación, los cactos y las plantas suculentas poseen gruesas cutículas céreas, y sus estomas (poros que permiten la entrada de dióxido de carbono y la salida de vapor de agua) están protegidos del calor del aire. Además, estas plantas poseen grandes reservas internas de agua. Varias especies de arbustos del desierto de Namibia constan sólo de tallos verdes fotosintéticos, con los estomas ocultos en profundos surcos a los lados del tallo. En las raras ocasiones en que cae un chaparrón, se forman rápidamente varias hojas de corta duración, para incrementar la fotosíntesis durante el breve período de abundancia de agua.

Otra planta adaptada al desierto es la *Welwitschia* de Namibia, una gimnosperma del grupo de las coníferas, pero que parece un helecho de frondes planos, y que es capaz de sobrevivir durante más de mil años con sólo dos hojas que crecen constantemente. Se cree que la *Welwitschia* es la única gimnosperma capaz de realizar un método de fotosíntesis conocido como MAC (p. 109), que reduce la pérdida de agua.

Los mamíferos herbívoros que viven en el desierto, como el elán y el órice africanos, hacen gala de una enorme tolerancia a la sequedad. Ambos animales son capaces de vivir en condiciones muy calurosas sin beber agua. Reducen la pérdida de agua expulsando excrementos secos y orina concentrada. La única pérdida significativa —y aun así muy pequeña— se produce por evaporación a través de la piel, y en el órice constituye el 60 por 100 de la pérdida total de agua.

Los órices satisfacen sus necesidades de agua por medio de la comida y gracias al metabolismo de los hidratos de carbono, que desprende agua como subproducto. Durante el día, las hierbas que comen sólo contienen un 1 por 100 de agua, pero por la noche, al aumentar la humedad relativa del aire, se forma rocío sobre la hierba, y es entonces cuando los órices comen. El pasto cubierto de rocío puede contener hasta un 42 por 100 de agua.

Cuando la temperatura del aire es muy elevada, casi todos los mamíferos mantienen su temperatura corporal en torno a los 37° C, perdiendo agua a través de la piel, en forma de sudor. El agua que se evapora hace perder calor. Como el órice no puede recurrir a la evaporación del sudor para refrescarse, prescinde de controlar su temperatura corporal. Al igual que el camello, el órice no suda durante el día, con lo cual su temperatura sube unos 6 ó 7° C . Por la noche recupera la temperatura normal, desprendiendo calor por conducción y radiación, métodos que no implican pérdida de agua.



Algunos animales del desierto, como el órice, han desarrollado un sistema de intercambio de calor que les permite funcionar en condiciones muy calurosas. Bajo el cerebro poseen unos senos cavernosos en los que la sangre arterial caliente cede su calor a la sangre venosa. De este modo, la sangre arterial llega al cerebro enfriada, evitando que este órgano vital se recaliente.

NUEVAS RUTAS PARA LA FOTOSÍNTESIS

La maquinaria metabólica de las plantas verdes está centrada en la fotosíntesis, un proceso que aprovecha la luz del Sol para sintetizar hidratos de carbono a partir de agua y dióxido de carbono. El calor y la sequía obligan a las plantas a afrontar dos problemas: el primero es la pérdida de agua por evaporación a través de los poros. El dióxido de carbono penetra por los poros, llegando hasta los cloroplastos de las células de las hojas, donde tiene lugar la fotosíntesis. Pero cuando el dióxido de carbono entra en la célula, de ésta escapa vapor de agua que es preciso reponer.

El segundo problema consiste en que el oxígeno —un subproducto de la fotosíntesis— inhibe uno de los primeros pasos de la fijación del dióxido de carbono para formar azúcares. Por si fuera poco, esta inhibición es mayor cuando la temperatura aumenta. El paso afectado consiste en la formación de ácido fosfoglicérico, un compuesto con tres átomos de carbono.

A causa de este paso, la fotosíntesis normal se denomina «fotosíntesis C_3».

En los climas templados, casi todas las plantas, desde los robles a los dientes de león, realizan la fotosíntesis C_3, porque las pérdidas de agua se pueden reponer con facilidad absorbiéndola del suelo y la temperatura nunca es tan alta como para que se produzca la inhibición por el oxígeno. Sin embargo, en condiciones constantemente secas y calurosas, donde la pérdida de agua y la inhibición por oxígeno afectan gravemente a la fotosíntesis C_3 algunas especies vegetales han encon-



trado rutas metabólicas alternativas que presentan claras ventajas selectivas.

Los cactos y las plantas suculentas, por ejemplo, recurren a un proceso llamado Metabolismo del Ácido Crasuláceo (MAC), así llamado en alusión a la familia de las Crasuláceas, que fueron las primeras plantas en las que se observó. Estas plantas cierran sus poros durante el día para evitar la evaporación excesiva, y los abren durante el fresco de la noche. El dióxido de carbono que penetra en las plantas se fija en un compuesto de cuatro carbonos, el ácido oxalacético, que actúa como reserva provisional de dióxido de carbono durante las horas de oscuridad. Al salir el sol, los poros se cierran y el dióxido de carbono sale de su «almacén» para ser utilizado en la fotosíntesis.

Durante los años sesenta, los científicos descubrieron que en algunas plantas tropicales de crecimiento rápido, como el maíz, la caña de azúcar y el papiro, las dos fases de la fotosíntesis MAC tienen lugar simultáneamente. La fijación provisional del dióxido de carbono en un compuesto de cuatro carbonos se lleva a cabo continuamente durante las 24 horas del día en las células del mesófilo de las hojas. Durante el día, la molécula-almacén se transfiere a las células ricas en cloroplastos que rodean los haces vasculares de las hojas. Allí se lleva a cabo la llamada fotosíntesis C_4, que no parece sufrir inhibición por parte del oxígeno y resulta muy eficiente en condiciones de mucho calor y abundante luz.

Muchas plantas tropicales, como la caña de azúcar y el papiro (*Cyperus papyrus*, izquierda), llevan a cabo una modalidad especial de fotosíntesis llamada C_4. Esta adaptación permite a las plantas crecer muy aprisa con una mínima pérdida de agua en condiciones secas y calurosas.

Las ventajas selectivas de la fotosíntesis C_4 dependen del clima. Por ejemplo, en el clima fresco de las islas Británicas sólo crecen unas pocas gramíneas con fotosíntesis C_4, mientras que en la soleada California el 80 por 100 de las gramíneas realizan este tipo de fotosíntesis.

ADAPTACIONES A LA INMERSIÓN

A lo largo de los últimos 50 millones de años, varios tipos de mamíferos terrestres —los antepasados de las ballenas, las focas y las morsas— se fueron adaptando a vivir en el mar. Las focas presentan las adaptaciones necesarias para que un animal cuyo cuerpo está construido para vivir en el aire a presión normal pueda sumergirse a 500 metros de profundidad y permanecer allí, a una presión muy superior a la normal, durante más de una hora.

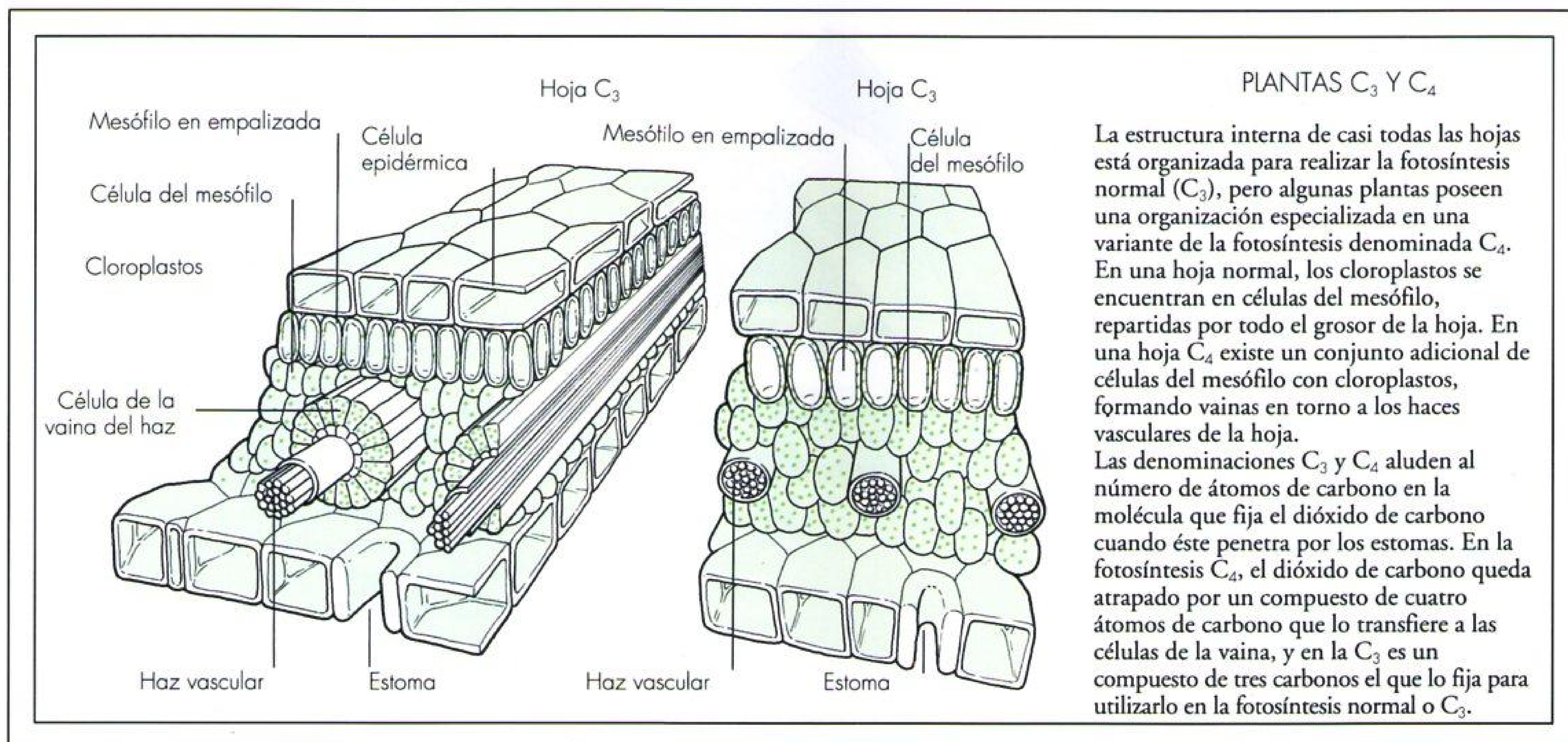
Una combinación de adaptaciones en el funcionamiento del aparato circulatorio, la respiración y el metabolismo celular permiten a estas focas actuar con eficiencia en condiciones extremas, que matarían a un ser humano en cuestión de segundos.

La foca de Weddell, por ejemplo, se sumerge a grandes profundidades en busca de bacalaos en las gélidas aguas del Antártico. Una gruesa capa de grasa aislante la protege del intenso frío del agua, y un enorme volumen de sangre, extraordinariamente rica en hemoglobina, lleva a cabo un activísimo transporte de oxígeno.

Cuando la foca comienza a bucear, su bazo libera hasta 24 litros de glóbulos rojos para intensificar el transporte de oxígeno. El ritmo cardiaco desciende espectacularmente, y el suministro de sangre queda limitado a los órganos más esenciales. A profundidades de 500 metros, los pulmones se deshinchan por completo, y el aire residual se almacena en huecos de la tráquea reforzada. Sin esta estrategia, que impide que se disuelva en la sangre un exceso de nitrógeno, la foca sufriría la «narcosis de las profundidades» (un peligroso desprendimiento de burbujas de nitrógeno en la sangre) al regresar a la superficie. Durante la inmersión, los tejidos no esenciales funcionan de manera anaerobia, dando lugar a productos residuales como el ácido láctico, que tienen que descomponerse cuando la foca vuelve a respirar oxígeno.

LA VIDA EN LAS TINIEBLAS

En 1977, el sumergible científico *Alvin* exploró el océano Pacífico al nordeste de



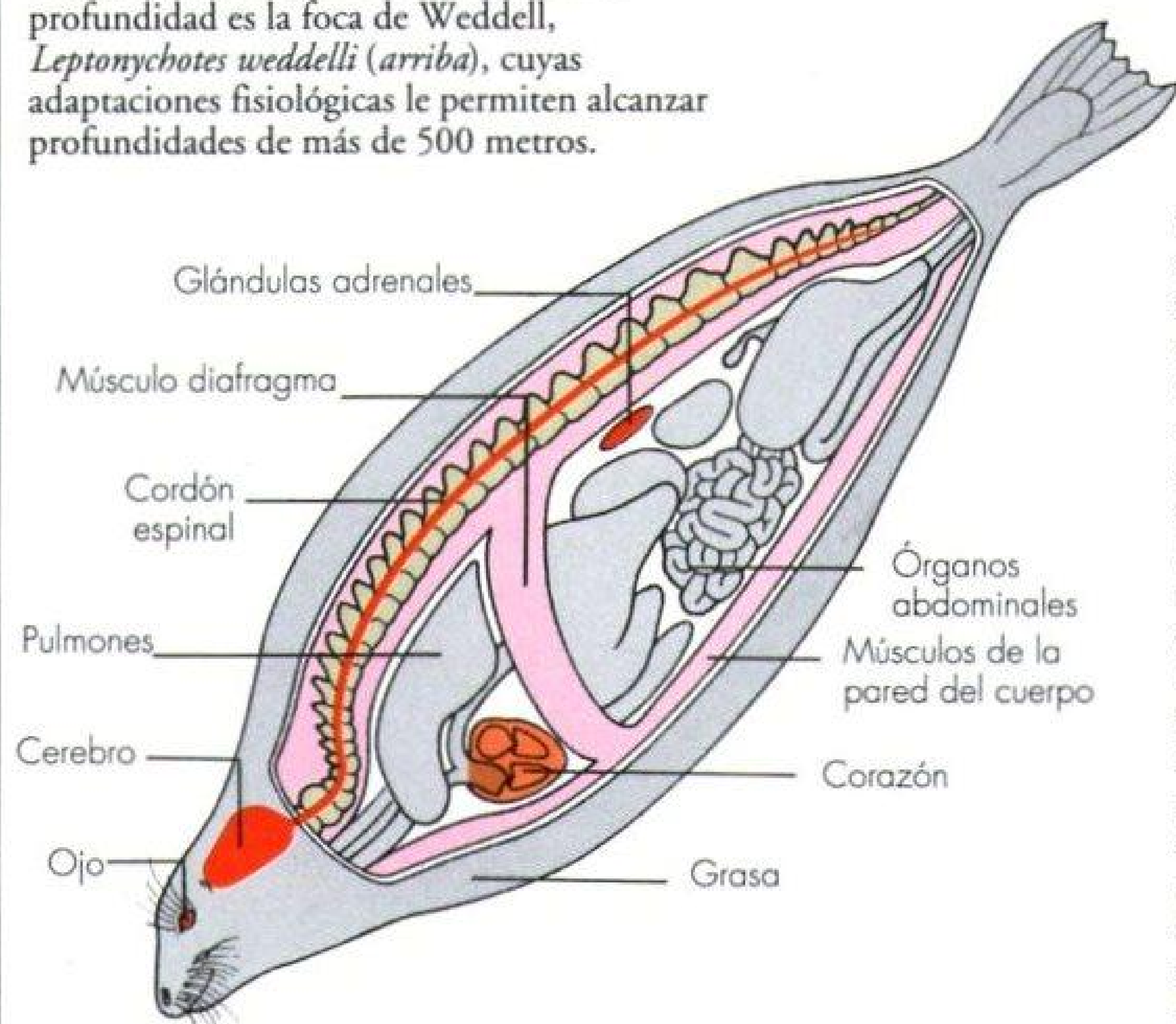
PLANTAS C_3 Y C_4

La estructura interna de casi todas las hojas está organizada para realizar la fotosíntesis normal (C_3), pero algunas plantas poseen una organización especializada en una variante de la fotosíntesis denominada C_4. En una hoja normal, los cloroplastos se encuentran en células del mesófilo, repartidas por todo el grosor de la hoja. En una hoja C_4 existe un conjunto adicional de células del mesófilo con cloroplastos, formando vainas en torno a los haces vasculares de la hoja.
Las denominaciones C_3 y C_4 aluden al número de átomos de carbono en la molécula que fija el dióxido de carbono cuando éste penetra por los estomas. En la fotosíntesis C_4, el dióxido de carbono queda atrapado por un compuesto de cuatro átomos de carbono que lo transfiere a las células de la vaina, y en la C_3 es un compuesto de tres carbonos el que lo fija para utilizarlo en la fotosíntesis normal o C_3.

ADAPTACIONES A LA INMERSIÓN



Una de las focas que se sumergen a más profundidad es la foca de Weddell, *Leptonychotes weddelli* (*arriba*), cuyas adaptaciones fisiológicas le permiten alcanzar profundidades de más de 500 metros.



Cuando una foca de Weddell se sumerge, conserva el oxígeno cortando el suministro de sangre oxigenada (en color rojo) a todos los órganos que no sean esenciales para el movimiento y la navegación. El músculo cardiaco sigue recibiendo sangre, pero en cantidades reducidas.

las islas Galápagos y descubrió la existencia de comunidades vivas increíblemente densas, que vivían en la absoluta oscuridad del fondo del océano. Estas prósperas comunidades se concentraban alrededor de chimeneas submarinas por las que salía agua caliente y muy mineralizada, a unos 2.500 metros por debajo de la superficie.

La paradoja de estas comunidades, que incluían moluscos bivalvos, pogonóforos tubícolas, crustáceos, peces y otros animales, consistía en que, al no existir plantas, parecían faltar los productores primarios necesarios para introducir energía en el sistema. En tierra firme y en aguas poco profundas, donde llega la luz del Sol, los productores primarios son siempre plantas verdes; los productos de su fotosíntesis mantienen a todos los demás organismos de la comunidad.

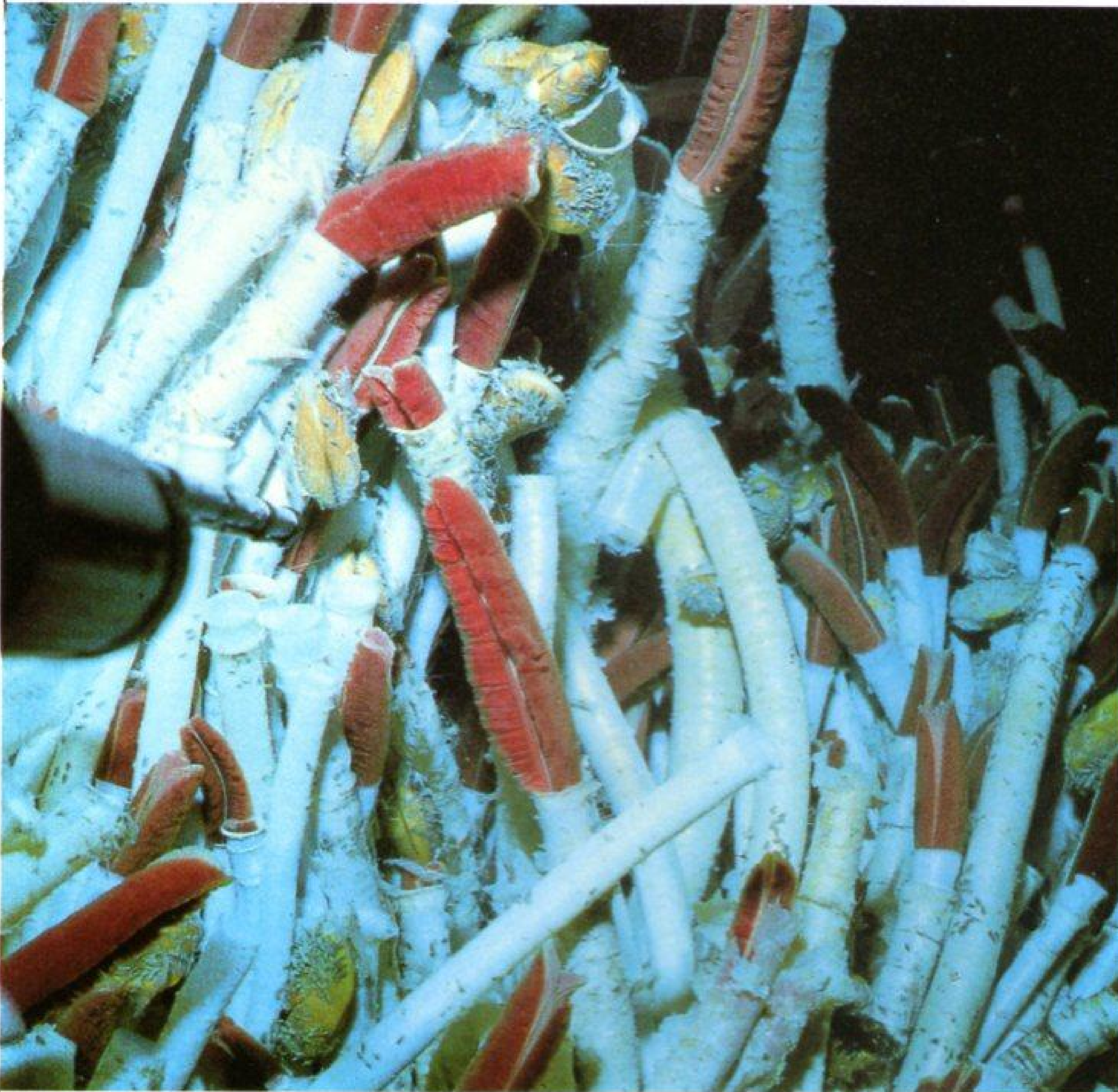
¿De qué se alimentaban los animales de las chimeneas submarinas? Las investigaciones acabaron por revelar que en estas comunidades y en otras similares (que desde entonces se han encontrado en muchas partes del mundo) existen bacterias capaces de generar energía a partir del sulfuro de hidrógeno contenido en el agua mineralizada. Así pues, los productores primarios de estos ecosistemas de profundidad son bacterias, y no plantas verdes. Algunos miembros de la comunidad se alimentan directamente de bacterias. Otros muchos, como los pogonóforos y los bivalvos, han incorporado bacterias a sus cuerpos, una simbiosis que les permite sacar provecho directo de la alquimia metabólica de estos microorganismos.

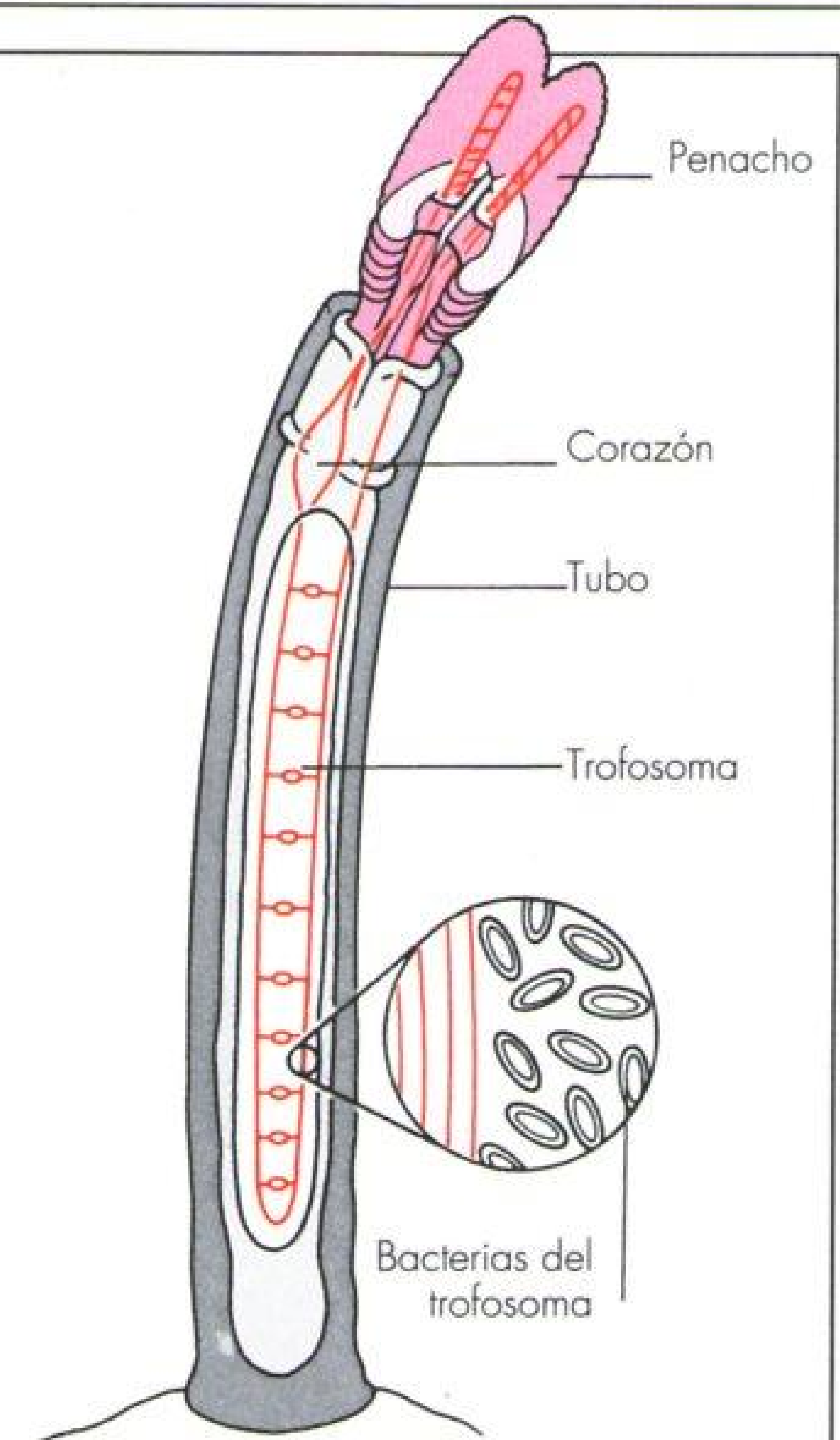
ADAPTACIONES AL FRÍO

La flora y fauna de las regiones de altas latitudes han desarrollado programas de cambios metabólicos estacionales para adaptarse a los rigores periódicos del invierno. Por lo general, estos programas están sintonizados con la variación en la duración del día. Por ejemplo, muchas plantas con flores se desprenden de sus hojas al acortarse los días, con lo que evitan los daños producidos por las heladas.

Los animales de sangre caliente, que deben afrontar el problema de mantener su temperatura corporal a pesar del frío del invierno, tienen que gastar más energía —y por tanto, comer más— cuando las temperaturas descienden por debajo de cero, o bien renunciar a controlar su temperatura, optando por la hibernación. Dado que en

CHIMENEAS DE LAS PROFUNDIDADES

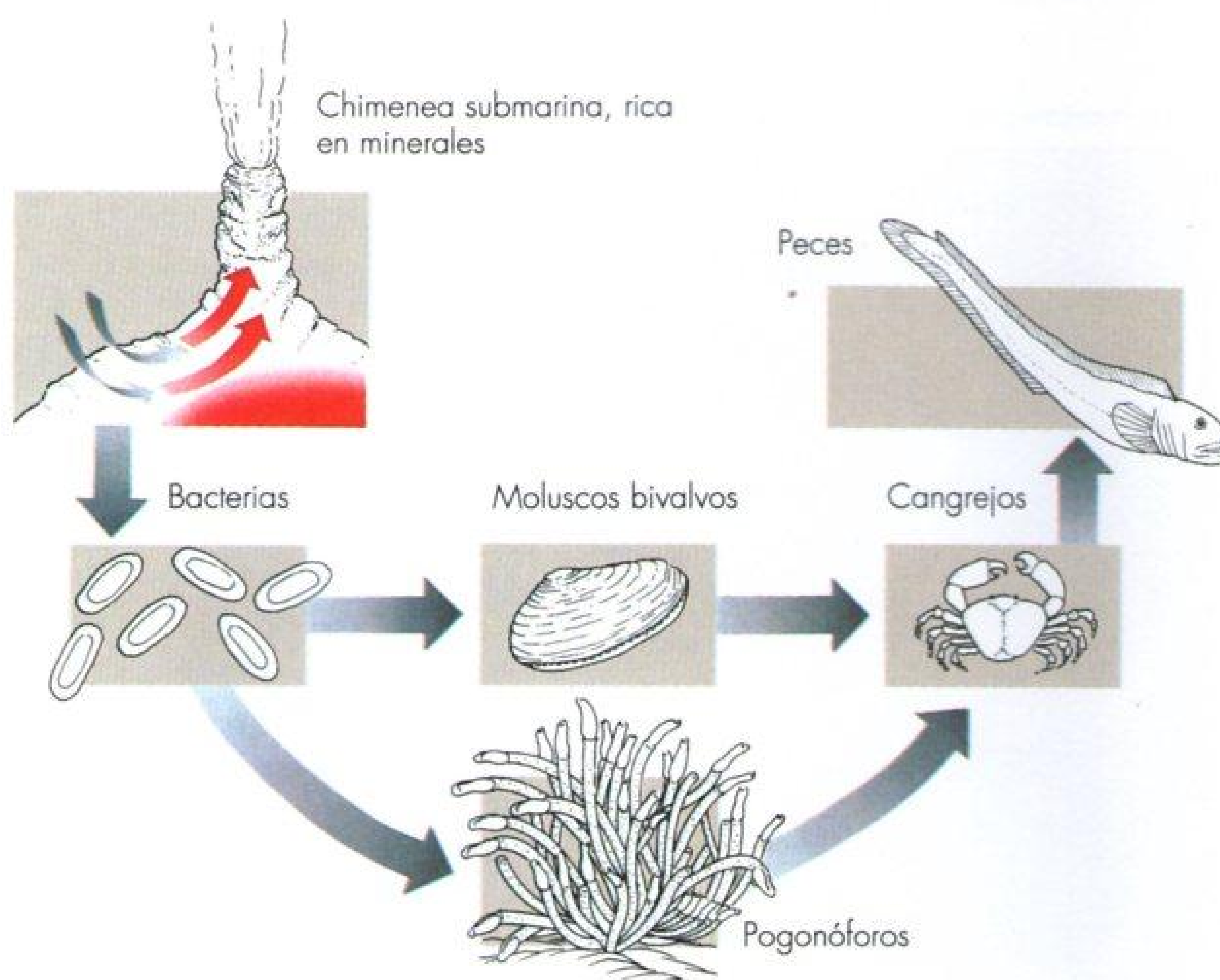




En la profundidad más oscura de los océanos, en torno a chimeneas que expulsan sulfuro de hidrógeno disuelto en agua caliente, viven comunidades de invertebrados tan densas como las de una costa rocosa bien iluminada. Su exuberante crecimiento da testimonio de las adaptaciones metabólicas de estos animales, y de las minúsculas bacterias que son los productores primarios de estas comunidades.

Como a estos lugares no llega la luz del sol, las comunidades de las chimeneas submarinas no dependen de las plantas fotosintéticas, como todas las demás del mundo. Aquí ha evolucionado un tipo único de ecosistema que depende de bacterias capaces de metabolizar el azufre del sulfuro de hidrógeno para generar energía.

Algunas de estas bacterias viven libres en el agua que rodea las chimeneas, y sirven de alimento a moluscos bivalvos filtradores. Otras viven en simbiosis con pogonóforos tubícolas (*arriba y arriba izquierda*), que dependen de ellas para su nutrición. Los pogonóforos carecen de tubo digestivo, y en su lugar el sistema circulatorio absorbe sulfuro de hidrógeno del agua, haciéndolo pasar al trofosoma, formado por células cargadas de bacterias. Las bacterias oxidan el sulfuro de hidrógeno, produciendo azufre y sintetizando compuestos ricos en energía que sirven de alimento a los pogonóforos. Algunos bivalvos recurren también a este tipo de simbiosis.

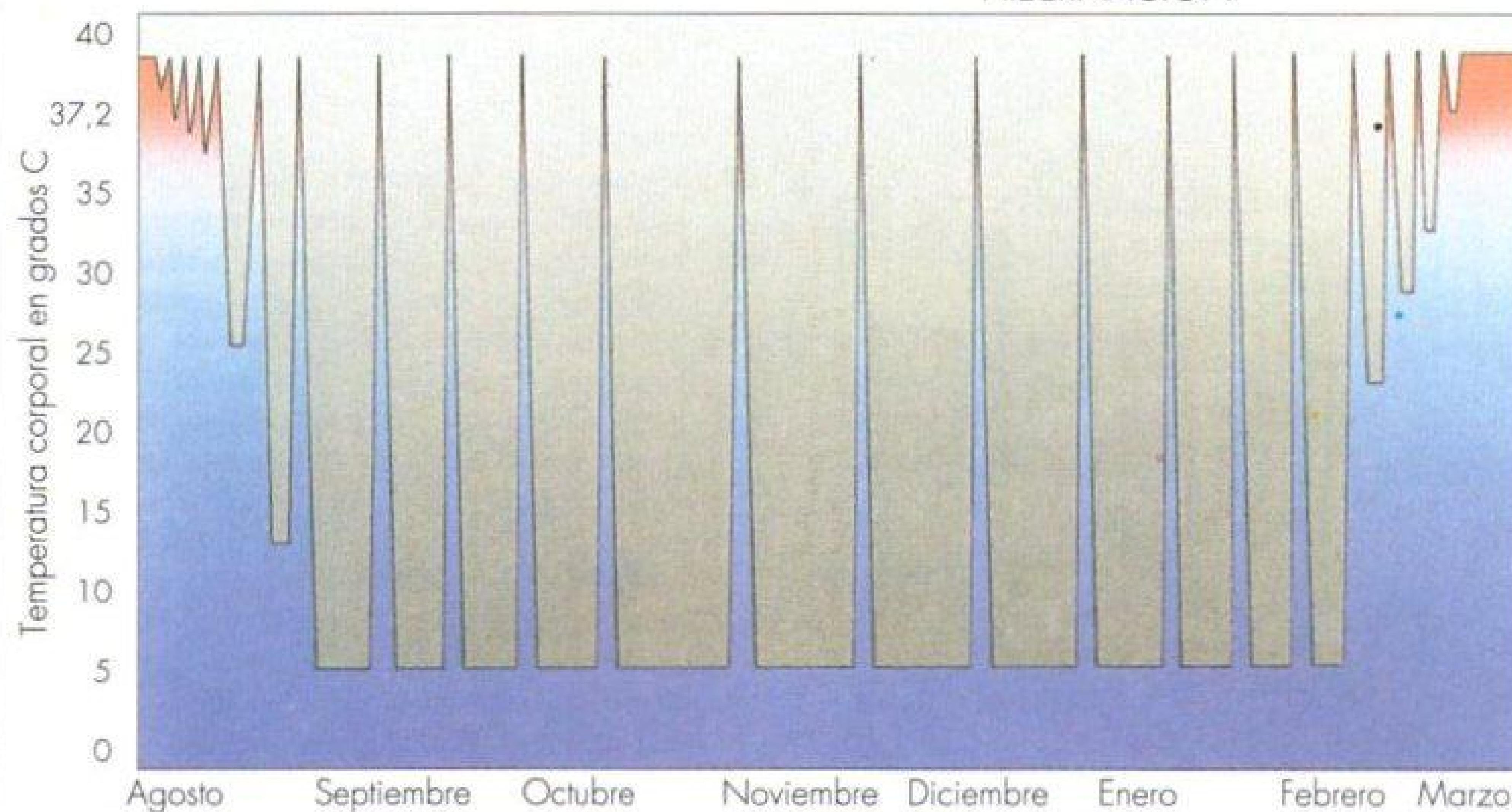


invierno escasea la comida, la hibernación se ha convertido en una estrategia evolutiva de supervivencia para animales como los lirones, los erizos, las marmotas y las ardillas. Para todos ellos resulta ventajoso no tener que mantener una temperatura corporal elevada durante la época más fría del año.

Mientras dura la hibernación, la actividad metabólica de estos mamíferos se reduce muchísimo. El ritmo respiratorio y el cardiaco se hacen muy lentos, y la temperatura corporal empieza a equipararse con la del aire que los rodea. Cuando despiertan, la temperatura comienza a elevarse a causa del metabolismo intensificado de las células grasas pardas, un tejido graso especializado que actúa como una manta eléctrica viviente. En estas células, una multitud de mitocondrias «quema» la grasa, generando tanto calor que el animal se va caldeando y su temperatura vuelve a ser normal.

ADAPTACIONES A LA VELOCIDAD

La abundancia de mitocondrias desempeña también un importante papel en las hazañas del campeón mundial de carreras de fondo, la antilocapra (*Antilocapra americana*), un antílope norteamericano que puede derrotar a cualquier otro animal en una carrera larga. Su velocidad máxima, 100 kilómetros por hora, sólo es superada por el guepardo; pero el guepardo sólo puede mantener esta velocidad durante unos pocos segundos, mientras que la antilocapra es



Algunos animales, como las ardillas de tierra, empiezan a hibernar en otoño. Cada noche, la temperatura del animal desciende un poco, y al llegar a los 5°C, la ardilla entra en letargo. Pero cada pocas semanas se despierta durante un breve tiempo y su temperatura vuelve a la normalidad. La hibernación permite al animal ahorrar enormes cantidades de energía, que podrían representar la diferencia entre sobrevivir al invierno o perecer. Algunos científicos opinan que la hibernación evolucionó en animales procedentes de climas cálidos, que carecían de potencial para las adaptaciones fisiológicas que les habrían permitido continuar activos durante los meses fríos.



La hibernación permite a los animales como el lirón *(izquierda)* eludir los rigores del invierno y la escasez de alimentos. La temperatura corporal desciende y el ritmo cardiaco se hace más lento, hasta que el animal cae en un estado de letargo, en el que se gasta un mínimo de energía para mantener con vida al cuerpo.

capaz de mantener velocidades de 65 kilómetros por hora durante más de diez minutos.

El secreto de la capacidad de la antilocapra reside en una combinación de adaptaciones fisiológicas y metabólicas que aumentan al máximo la producción y el gasto de energía. Una antilocapra puede utilizar el oxígeno tres veces más aprisa que cualquier mamífero de tamaño similar. Sus enormes pulmones presentan una inmensa superficie para absorber oxígeno, su sangre contiene una abundancia extraordinaria de hemoglobina y su corazón bombea a toda velocidad. Los músculos de las patas son muy grandes y las células musculares están repletas de mitocondrias productoras de ATP.

En términos evolutivos, esta adaptación a las carreras de alta velocidad parece haber logrado su objetivo: proporcionar un método para escapar de un depredador tan formidable como el lobo, el principal enemigo de la antilocapra.

La antilocapra norteamericana *(abajo)* posee adaptaciones fisiológicas y anatómicas para utilizar el oxígeno con tal eficiencia que se ha convertido en el campeón mundial de velocidad en larga distancia. El extraordinario tamaño de sus pulmones y su corazón le permiten procesar más oxígeno que ningún otro animal de dimensiones similares.

